Università degli Studi
Mediterranea
di Reggio Calabria

FISICA TECNICA

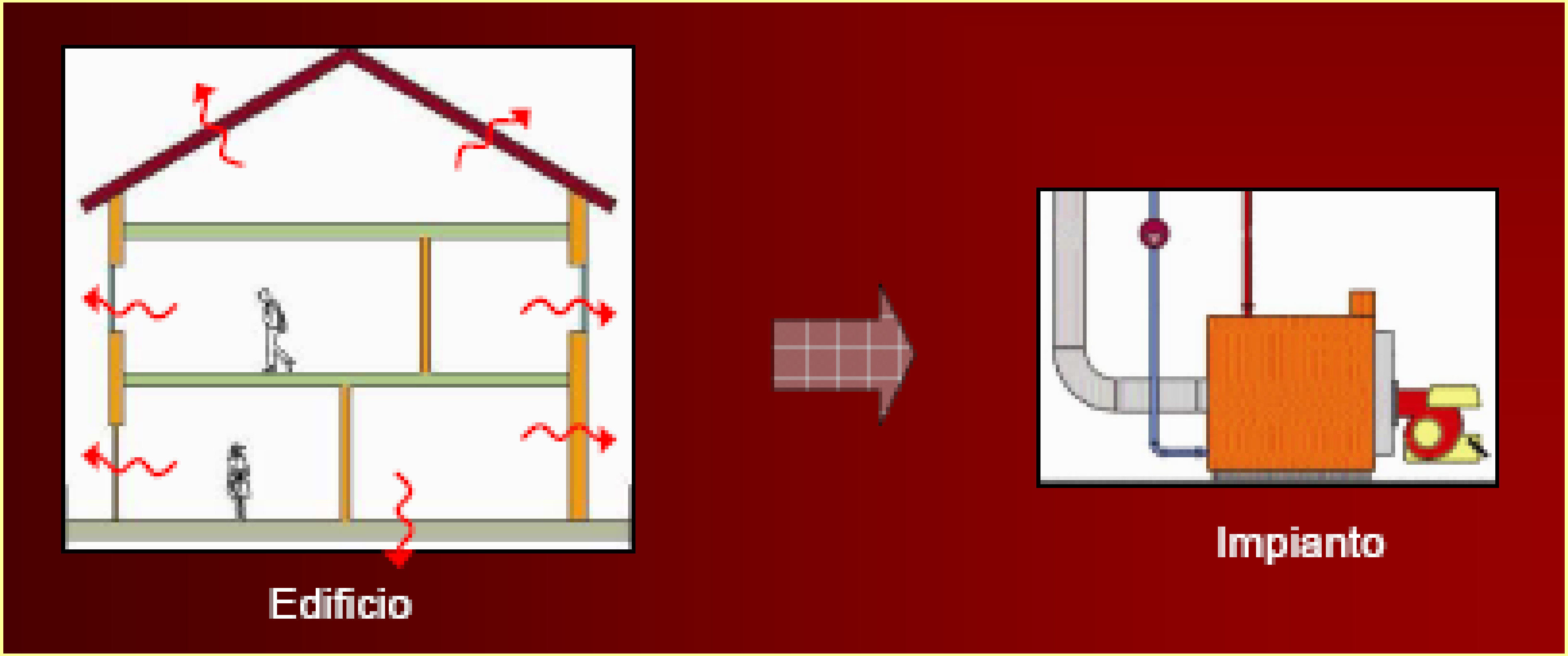
Prof. Ing. Marina Mistretta

Trasmissione del calore

a.a. 2017/2018

05/12/2017

L’edificio è un sistema aperto che scambia con l’ambiente massa ed energia:
- energia termica (calore)
- massa d’aria



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.

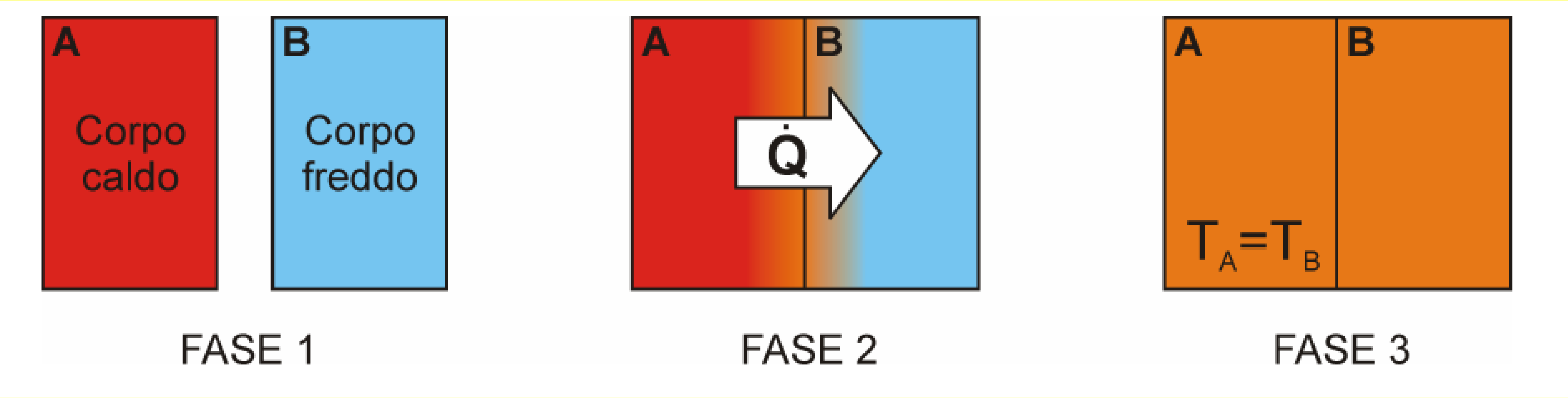
Introduzione alla trasmissione del calore

- 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

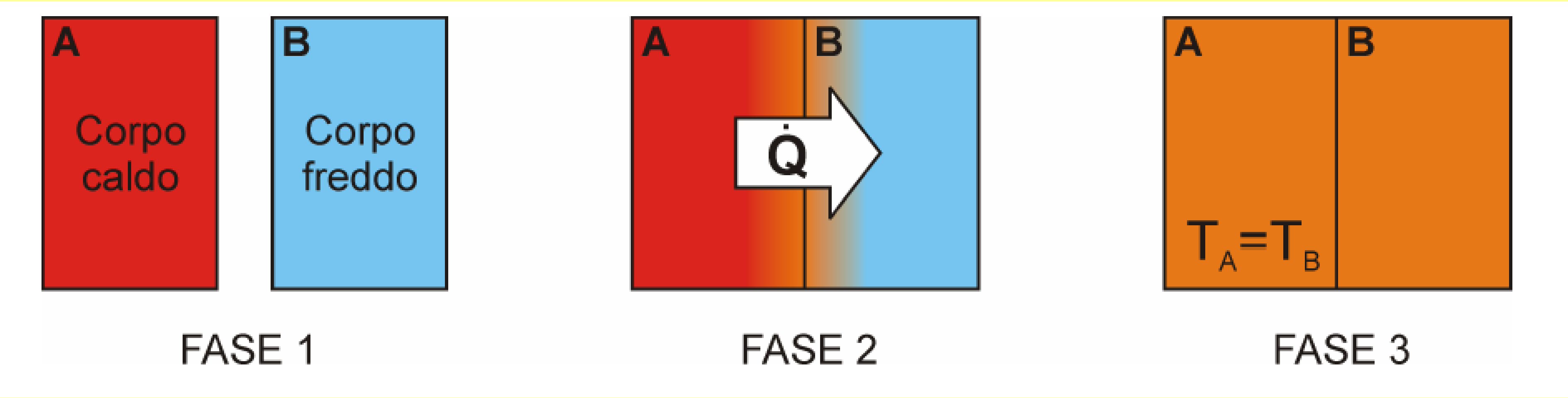
E’ un fenomeno fisico mediante il quale il calore tra due corpi viene trasmesso tramite contatto (senza trasporto di massa).

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.



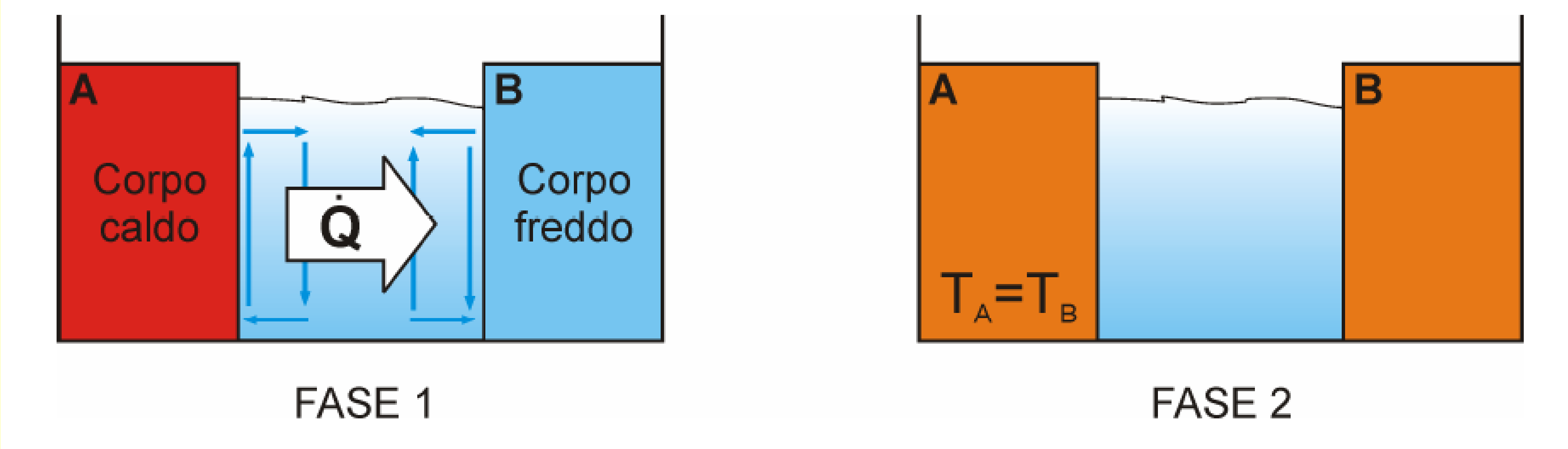
Conduzione

- 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.



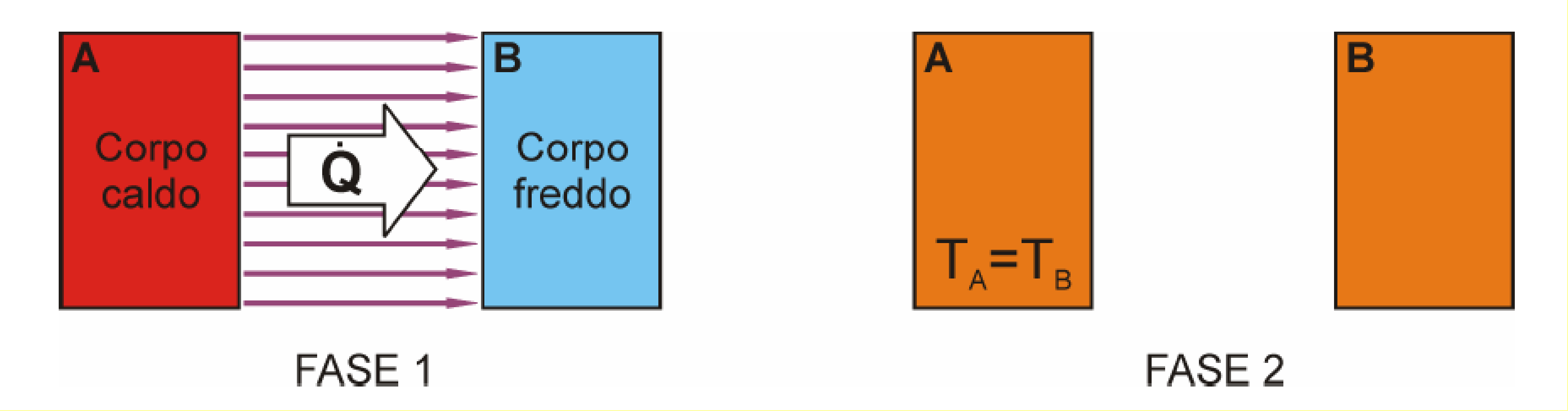
Convezione

- 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.



Irraggiamento

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



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

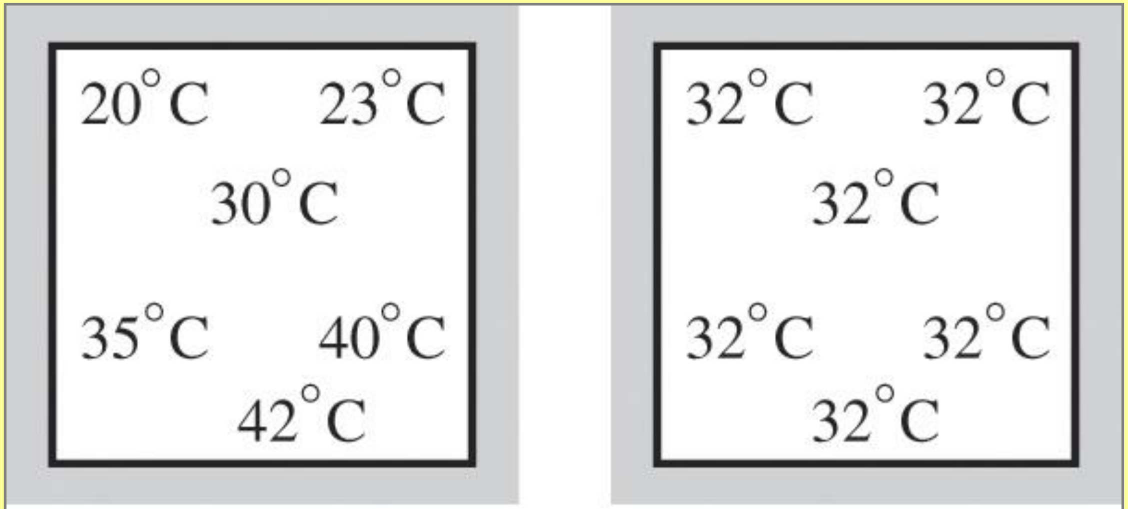
   ha lo stesso comportamento in ogni direzione;

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.



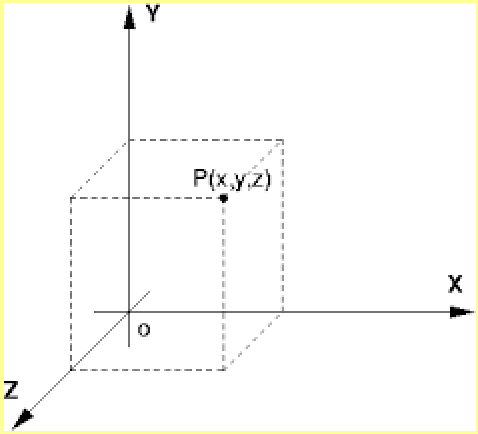
(*a*) Before (*b*) After

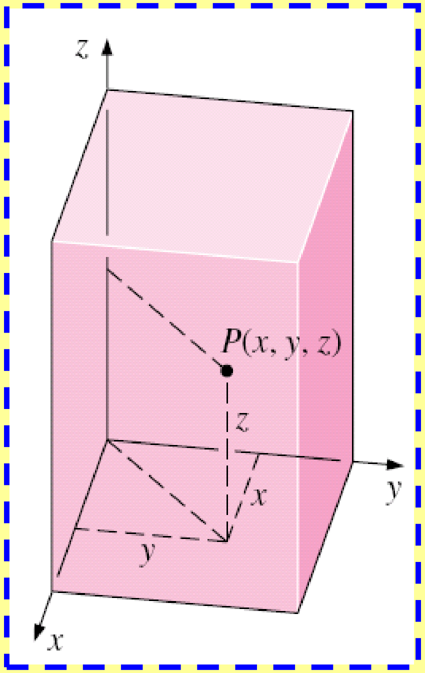
Conduzione

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

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

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





Conduzione

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

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:

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

Conduzione

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

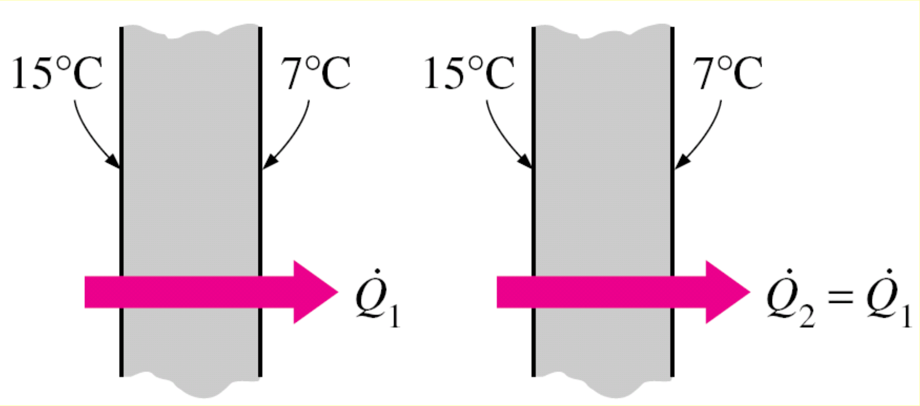
Il campo di temperatura quindi può essere funzione di tutte le coordinate o soltanto di due o una.

Un campo di temperatura monodimensionale stazionario ha l'espressione:

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

Campo di temperatura monodimensionale stazionario

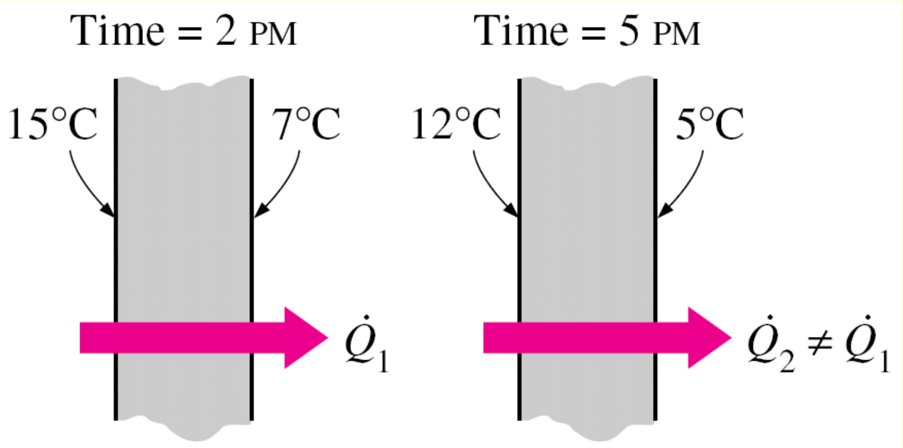
$$T = f(x); \qquad \frac{\partial T}{\partial \tau} = 0; \qquad \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0$$



La temperatura del corpo varia nel tempo:

Regime di temperatura monodimensionale e non stazionario

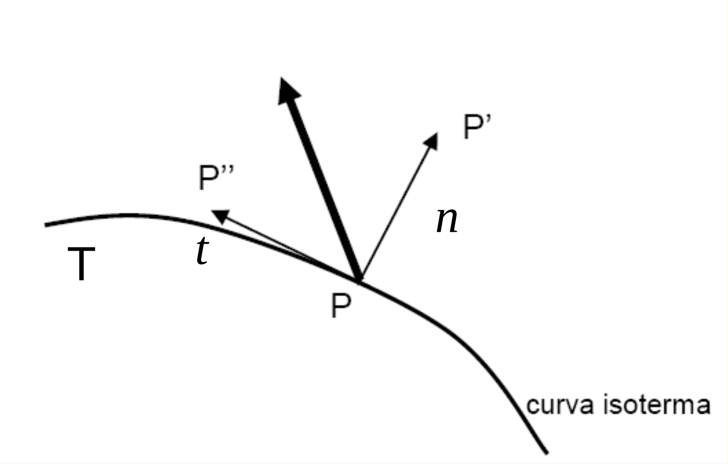
$$T = f(x, \tau); \qquad \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0$$



Conduzione

- Dalla continuità deriva la possibilità di individuare superfici isoterme;
- Queste superfici non possono né intersecarsi né avere punti di tangenza.

Presa una generica superficie isoterma (T) un qualsiasi flusso di calore in una generica direzione passante dal punto **P** definisce un vettore che può essere scomposto in due componenti una tangenziale alla superficie isoterma e l’altra perpendicolare.



Lungo la direzione tangenziale PP”
la variazione di temperatura $\Delta T = 0$,

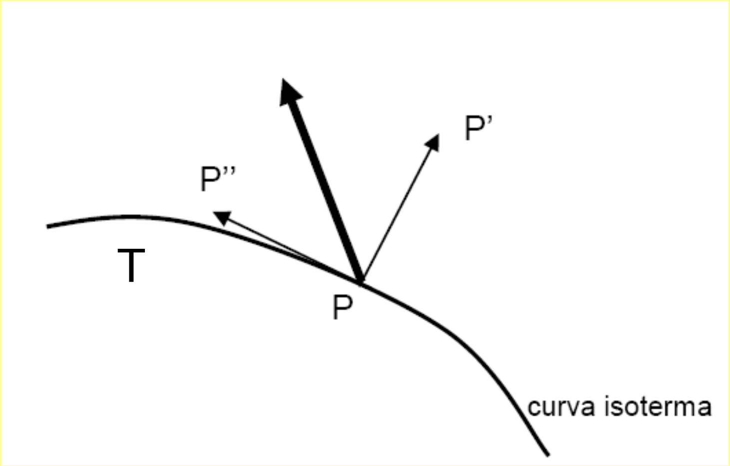
Lungo la direzione normale PP’
la variazione di temperatura $\Delta T \neq 0$

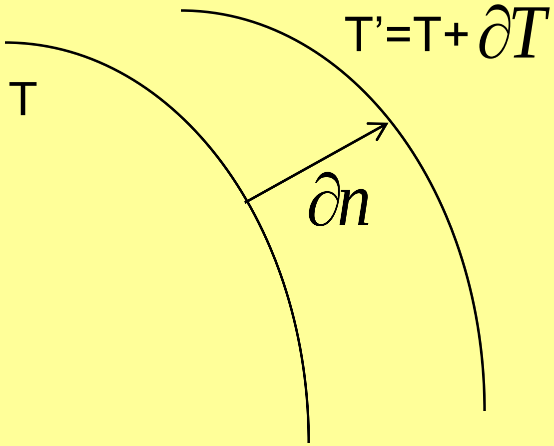
Conduzione

Il calore fluisce spontaneamente da punti a temperatura maggiore verso punti a temperatura minore, quindi **il flusso termico è positivo quando il gradiente di temperatura è negativo e viceversa.**

In accordo con **l'ipotesi di Fourier**, considerando due superfici isoterme a temperatura rispettivamente T e T'=T+ ∂T , di un mezzo omogeneo continuo e isotropo, l'energia termica trasmessa nell'intervallo di tempo $d\tau$ da **T** a **T+** ∂T nella direzione *n* é direttamente proporzionale al gradiente di temperatura

ΔT =**T' - T**





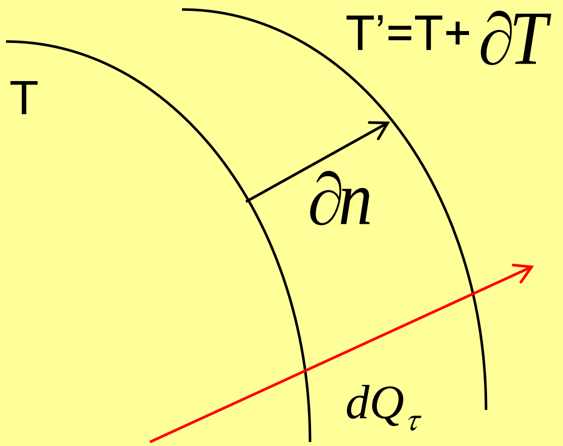
Legge di Fourier della conduzione

$$dQ_\tau = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} dS d\tau \qquad [J]$$

λ è detto **coefficiente di *conducibilità*** del materiale che compone il sistema.

λ è il termine di proporzionalità fra il flusso termico specifico ed il gradiente di temperatura;

la sua unità di misura è:



$$\lambda = -\frac{dQ_\tau \partial n}{\partial T dS d\tau} \Rightarrow \left[\frac{Jm}{sKm^2}\right] = \left[\frac{W}{mK}\right]$$

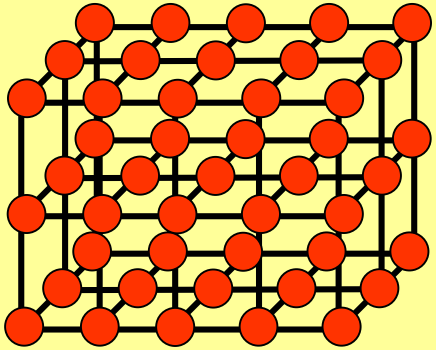
In generale il valore di λ non è costante ma varia in funzione della temperatura.

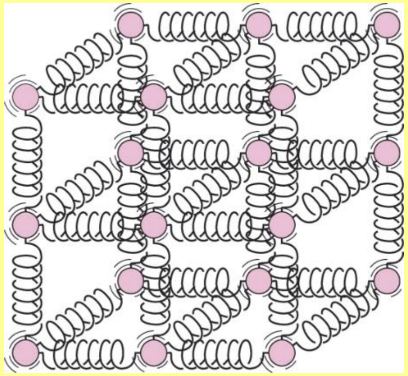
$$\lambda \cong \lambda_0 \cong \text{costante}$$

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 meno intenso rispetto ai solidi. La conducibilità nei liquidi è direttamente proporzionale 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 λ decrescente si passa da materiali conduttori a materiali isolanti.

Materiale	λ (W/mK)
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
Caucciù	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

Energia termica

$$dQ_{\tau} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} dS d\tau \qquad [J]$$

Potenza termica

$$dQ = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} dS \quad \left[\frac{J}{s}\right] [W]$$

La quantità di calore trasmessa nell'unità di tempo attraverso l'unità di superficie isoterma si dice ***flusso termico***.

$$q = \frac{dQ_{\tau}}{dS d\tau} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \qquad \left[\frac{W}{m^2}\right]$$

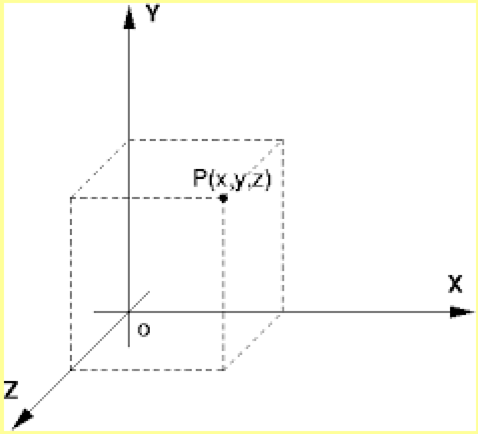
Postulato di Fourier - Flusso termico

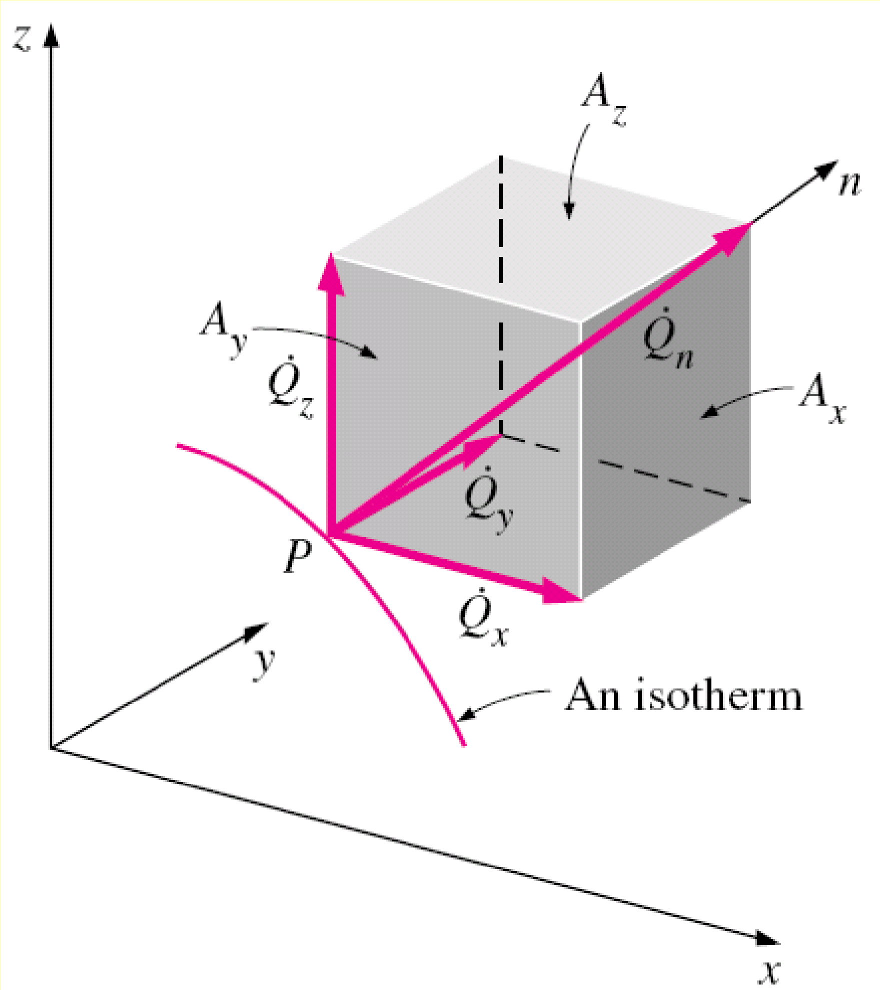
La quantità di calore trasmessa nell'unità di tempo (potenza) attraverso l'unità di superficie isoterma si dice *flusso termico*.

$$q = \frac{dQ_\tau}{dS d\tau} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \qquad \left[\frac{W}{m^2}\right]$$

Se la direzione *n viene riferita* ad un sistema di coordinate x,y,z , *q* si scompone nelle seguenti componenti:

$$q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x};\; q_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y};\; q_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z}$$





z
A_z
n
A_y
$\dot{Q}_z$
$\dot{Q}_n$
A_x
$\dot{Q}_y$
P
$\dot{Q}_x$
y
An isotherm
x

Postulato di Fourier - Flusso termico

Se la direzione *n viene riferita* ad un sistema di coordinate x,y,z , *q* si scompone nelle seguenti componenti:

$$q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x};\ q_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y};\ q_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z}$$

Dire che il flusso termico si propaghi in configurazione monodimensionale significa che esso si propagherà solo lungo una direzione (es. lungo *x*) perché la temperatura varierà solo lungo *x*. Questa condizione è legata alla geometria del mezzo di propagazione. Se:

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad e \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial x} \neq 0$$ **allora:**

$$q_y = 0 \quad q_z = 0 \quad q_x \neq 0, \quad q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad \left[\frac{W}{m^2}\right]$$

Flusso termico

$$q = \frac{dQ_\tau}{dS d\tau} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \qquad \left[\frac{W}{m^2}\right]$$

Dire che il flusso termico si propaghi in configurazione monodimensionale significa che esso si propagherà solo lungo una direzione (es. lungo *x*) perché la temperatura varierà solo lungo *x*. Questa condizione è legata alla geometria del mezzo di propagazione.

Quindi essendo

$$q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x};\ q_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y};\ q_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z}$$

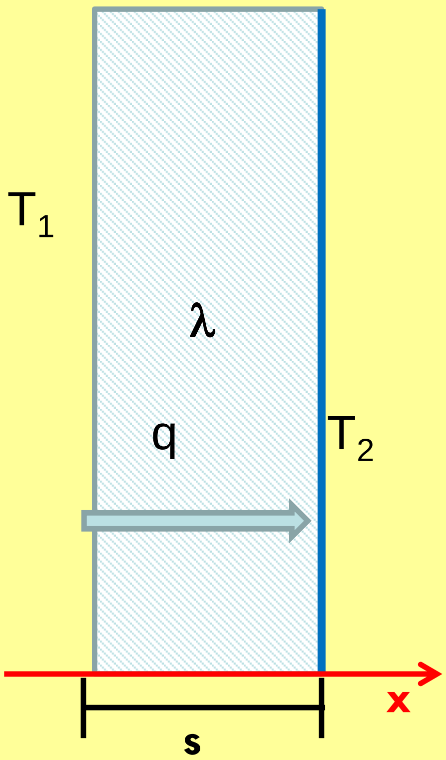
Se accade che:

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad e \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad \frac{\partial T}{\partial x} \neq 0$$

$$q_y = 0 \quad q_z = 0 \quad q_x \neq 0, \quad q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad \left[\frac{W}{m^2}\right]$$

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)

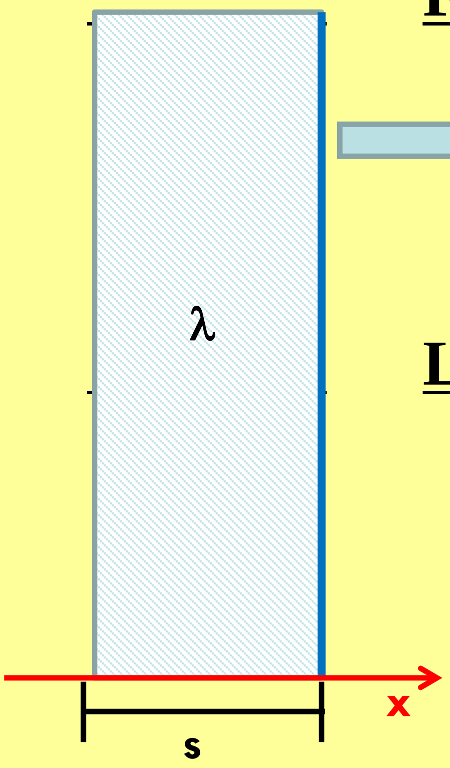
$$\boxed{q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad \left[\frac{W}{m^2}\right]}$$

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

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

Esempio n.1

La conduzione stazionaria in uno **strato piano semplice**



Flusso termico

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

Legge di variazione della temperatura

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

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

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

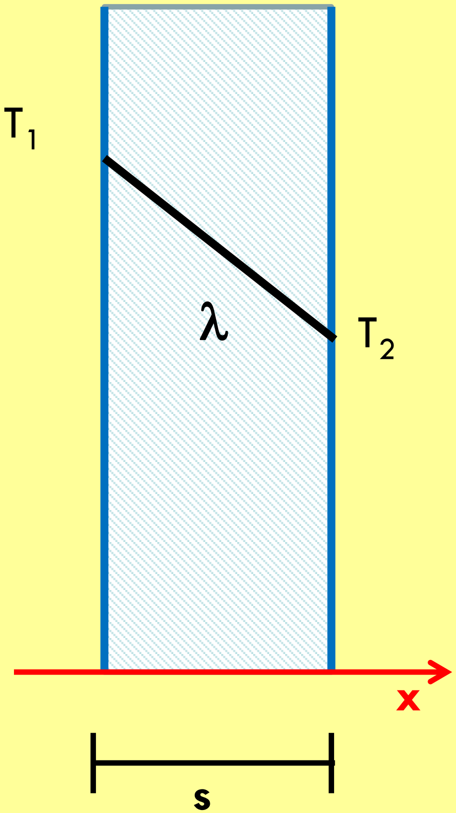
Esempio

Conduzione stazionaria in uno **strato piano semplice**

Essendo

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

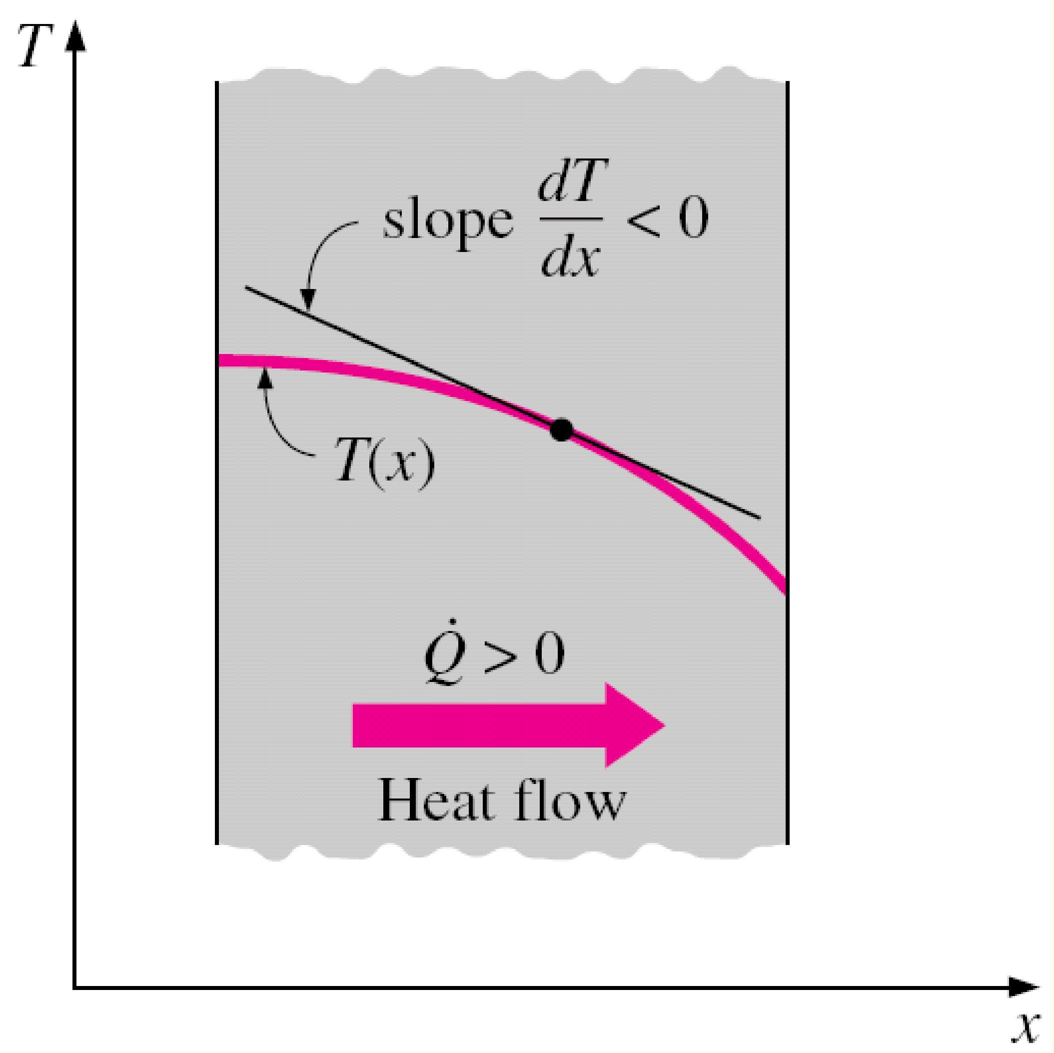
$$q = \frac{\lambda}{s}(T_1 - T_2) \quad \left[\frac{W}{m^2}\right]$$



$$T = \left(\frac{T_2 - T_1}{s}\right) x + T_1$$

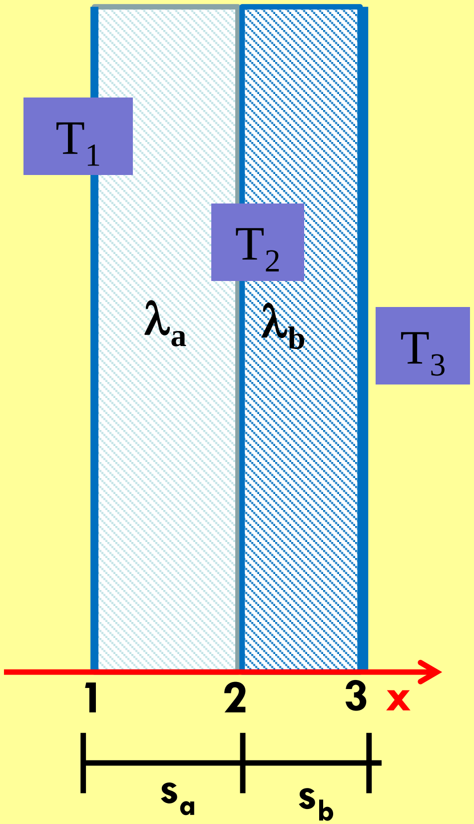
È stato determinato il campo di temperatura

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



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.

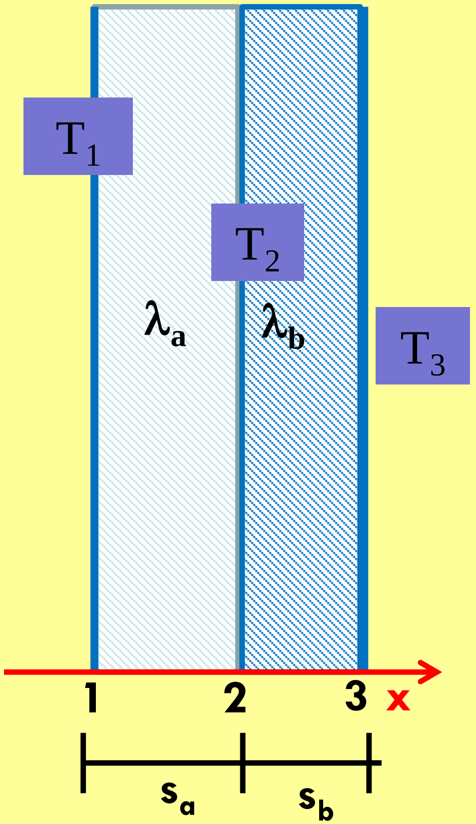
Strato s_a

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

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

Esempio n.2

Conduzione stazionaria in uno **strato piano multiplo**



Strato s_a

Con analogo ragionamento si ha:

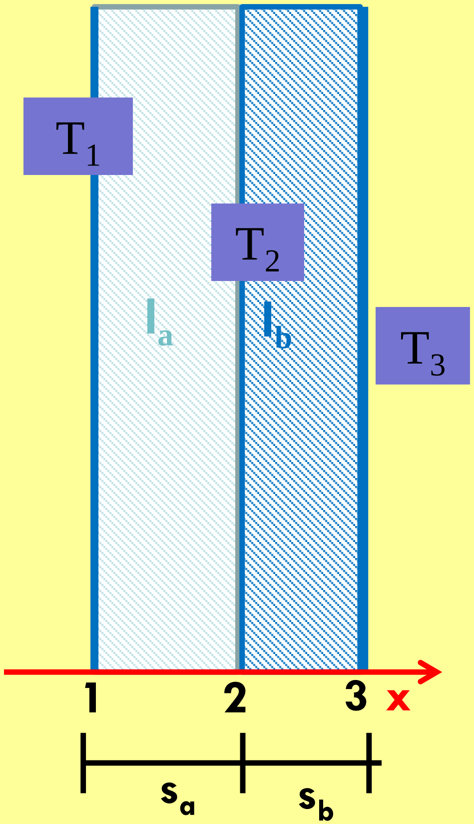
$$q_b = -\lambda_b \frac{dT}{dx} = -\lambda_b \left(\frac{T_3 - T_2}{s_b} \right) = \lambda_b \left(\frac{T_2 - T_3}{s_b} \right)$$

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

Esempio n.2

Conduzione stazionaria in uno **<u>strato piano multiplo</u>**

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



$$(T_1 - T_2) = \frac{q_a s_a}{\lambda_a} \qquad (T_2 - T_3) = \frac{q_b s_b}{\lambda_b}$$

ma $q = q_a = q_b$ in regime stazionario

Sommando membro a membro le due equazioni si ottiene:

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

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

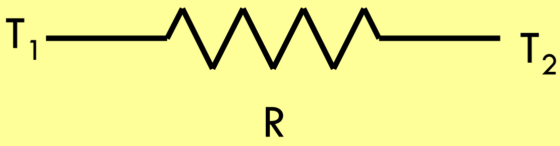
Resistenza conduttiva

Resistenza termica alla conduzione

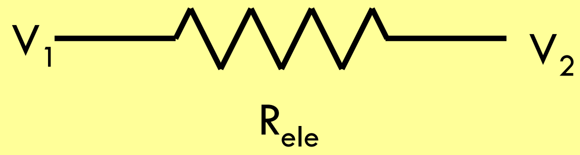
La resistenza termica di un mezzo dipende dalla geometria e dalla caratteristiche termiche del mezzo.

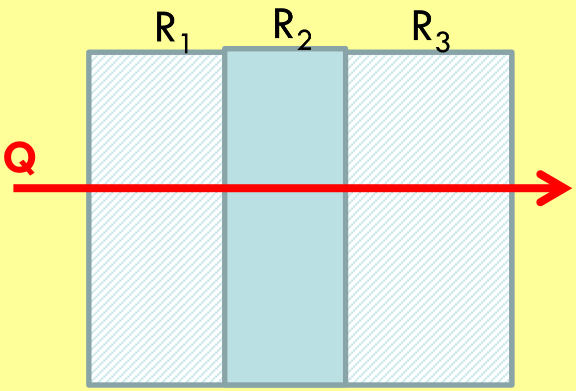
L'equazione del flusso termico è formalmente analoga alla relazione di Ohm del flusso di corrente elettrica:

$$Q = \frac{(T_1 - T_2)}{R}$$

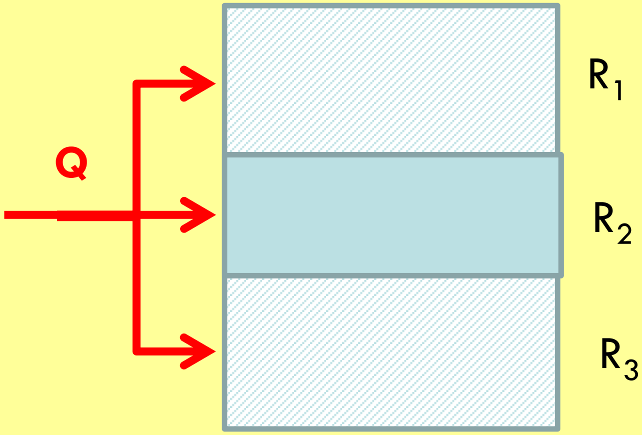


$$I = \frac{(V_1 - V_2)}{R_{ele}}$$





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

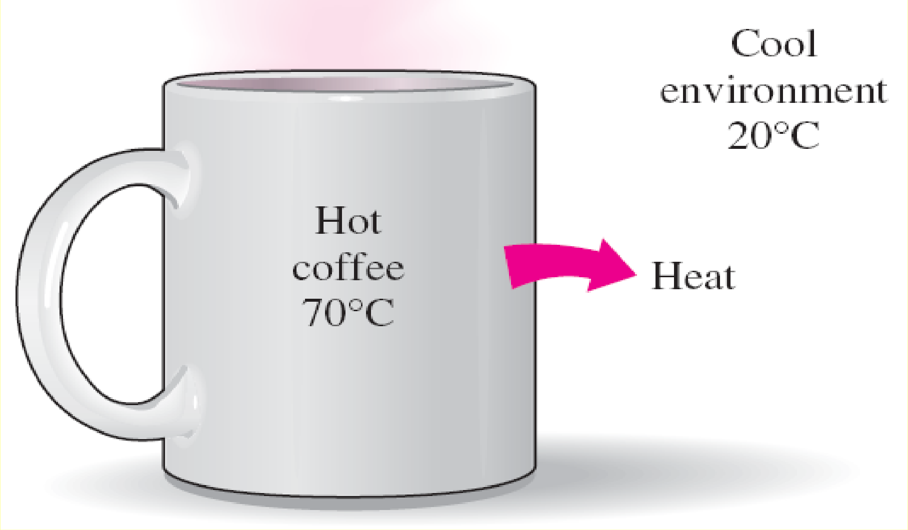


$$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$\Downarrow$$

$$R_{tot} = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3}$$

Cos'è la Convezione

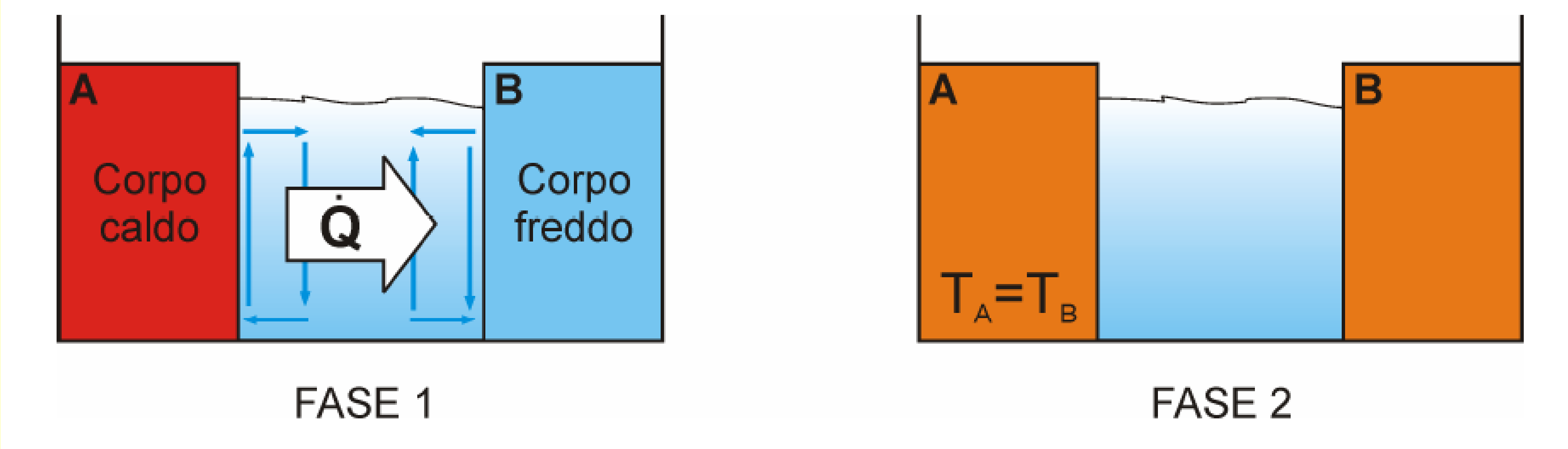


Il calore si disperde nel verso delle temperature decrescenti (dall'ambiente più caldo verso quello più freddo):

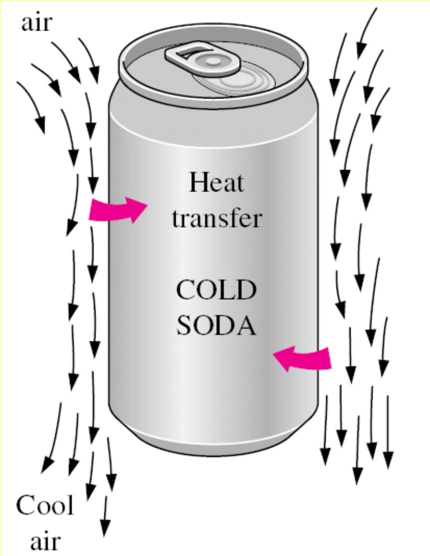
- attraverso il materiale solido (struttura molecolare fissa con particelle che vibrano attorno alla posizione di equilibrio) si propaga per <u>conduzione termica</u>
- dall'ambiente caldo verso la superficie solida per convezione e irraggiamento
- dalla superficie solida più fredda verso l'ambiente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

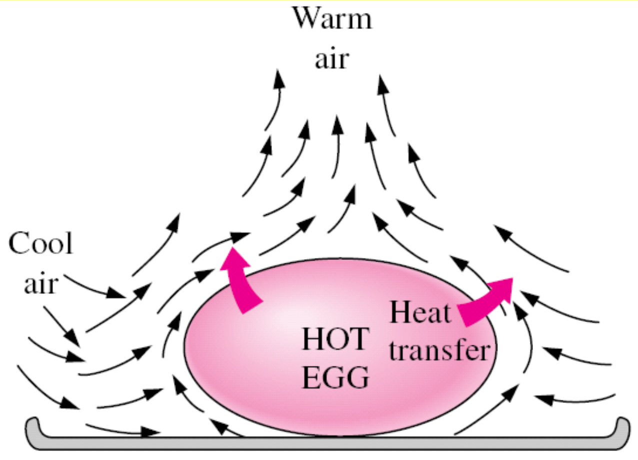
Convezione

- 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.



Convezione



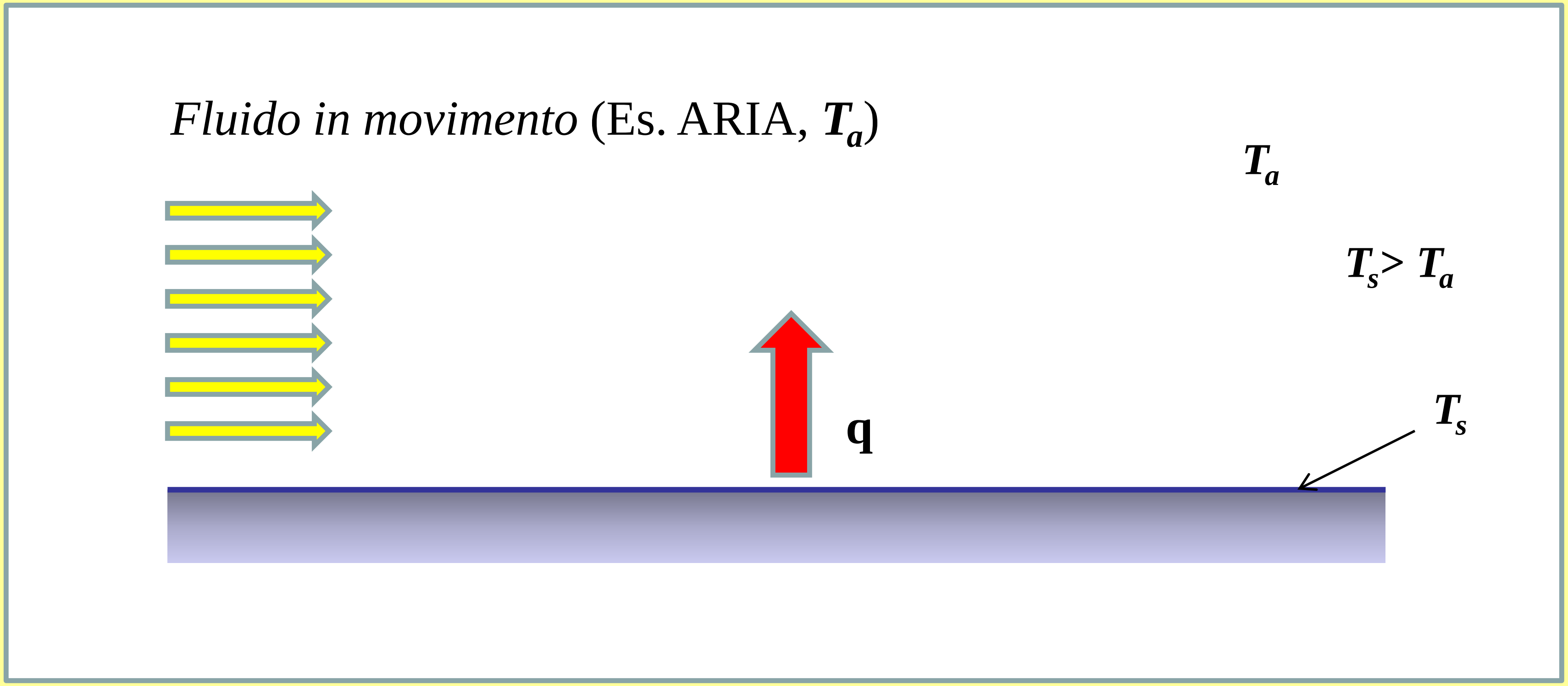


- Forze ascensionali che sono responsabili del moto naturale dell’aria per effetto di una differenza di temperatura e pressione
- Forze di viscosità che oppongono al moto dell’aria.

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.

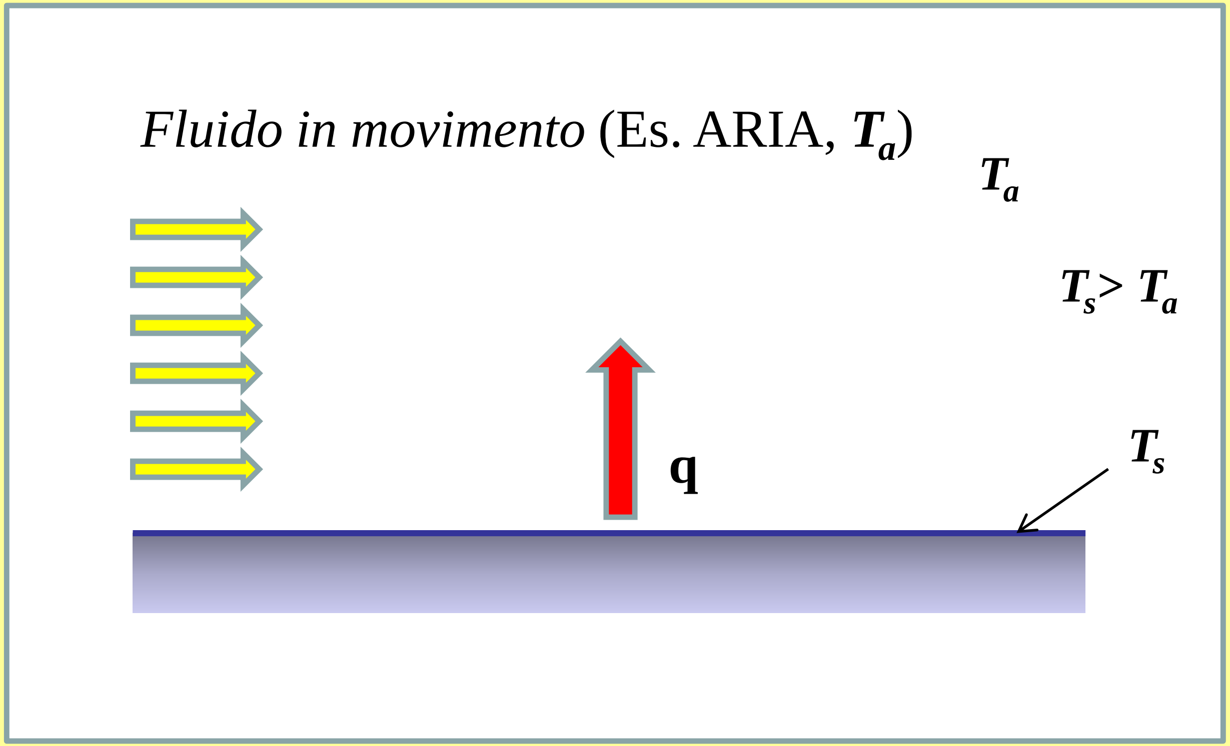


Convezione

Esistono due meccanismi in genere contemporanei:

- Urto casuale tra le particelle del fluido in movimento e trasmissione termica per conduzione (velocità u = 0)

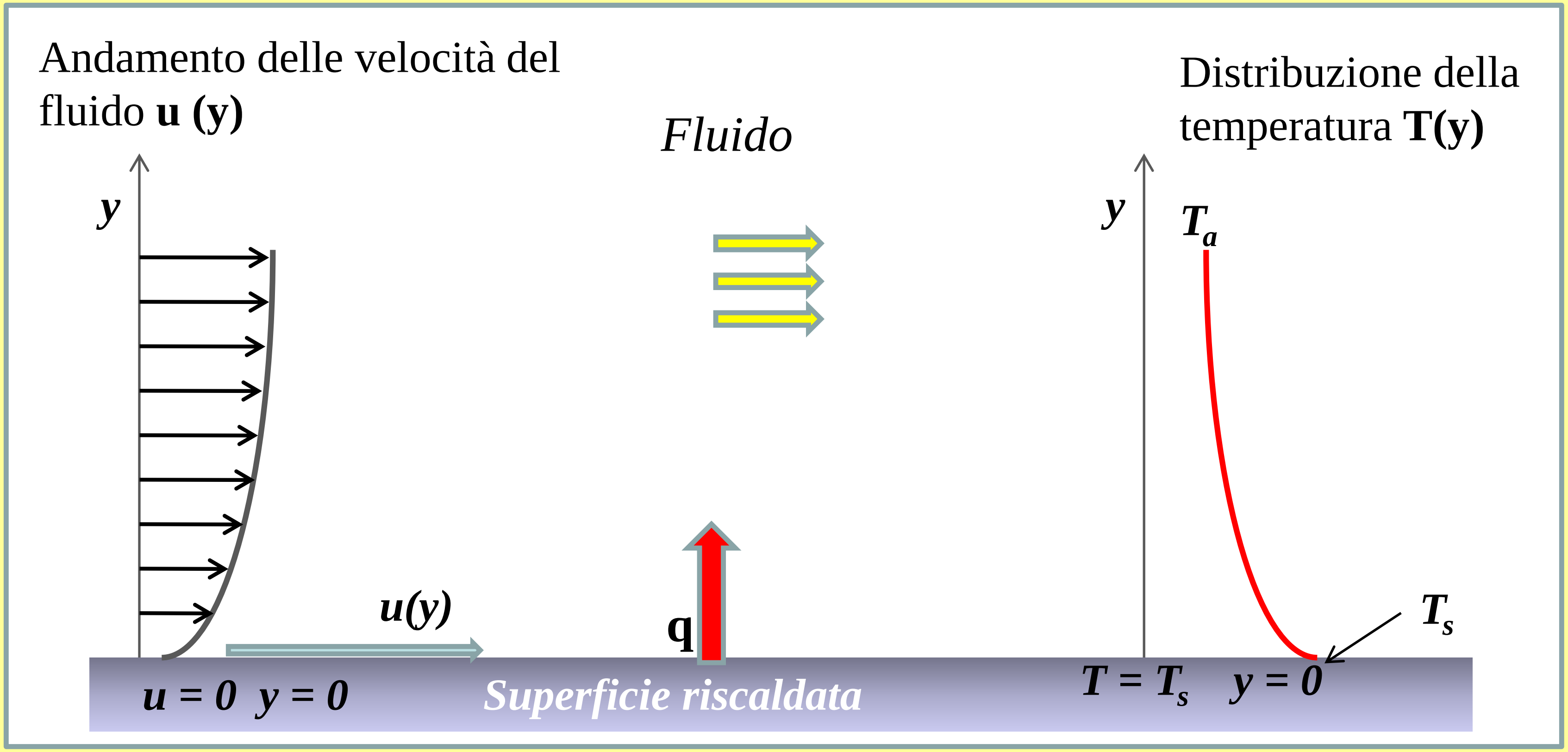
- Scambio di energia termica per trasporto di massa, ossia grazie al movimento del fluido (moto macroscopico). L'insieme delle particelle si muovono collettivamente per effetto di un gradiente di temperatura, contribuendo allo scambio di calore



In prossimità della superficie della parete la velocità dell'aria **u = 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

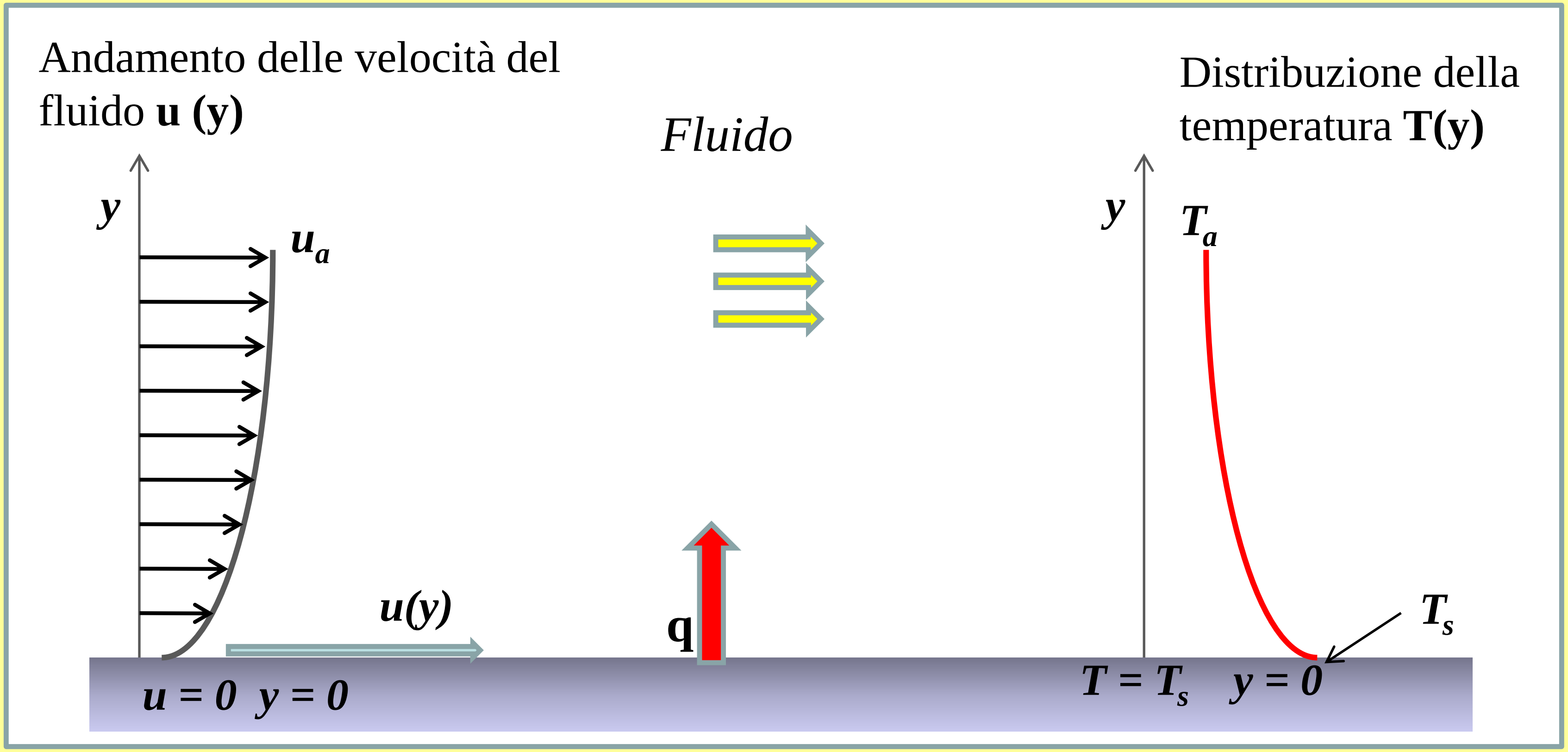
u (0, u_a)

Strato limite termico

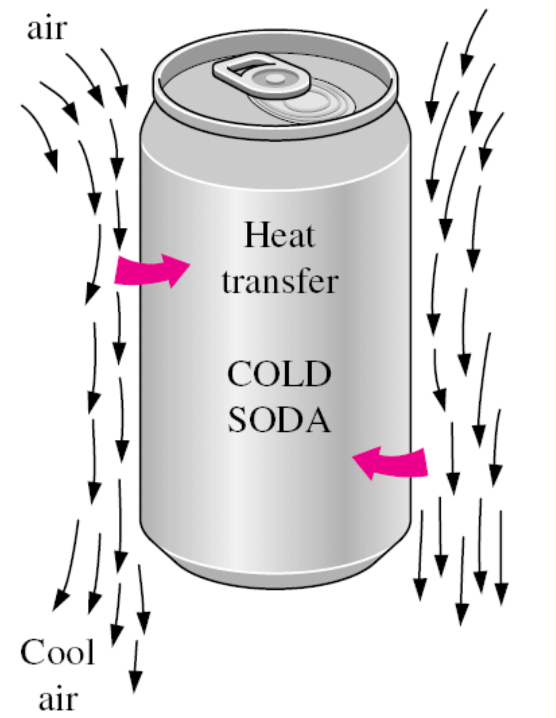
Regione di fluido adiacente alla parete in cui la temperatura del fluido varia da T_s (temperatura della superficie lambita) a T_a, temperatura della corrente indisturbata

CORRENTE INDISTURBATA:

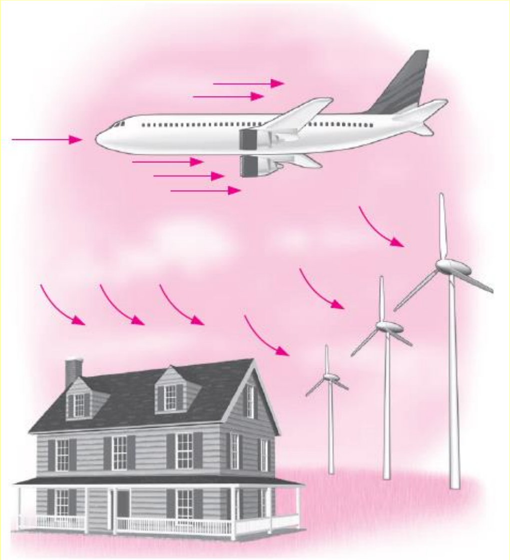
Porzione di fluido che circola nell'ambiente ad una distanza dalla superficie della parete solida tale da non risentire dei fenomeni di scambio termico PARETE- FLUIDO

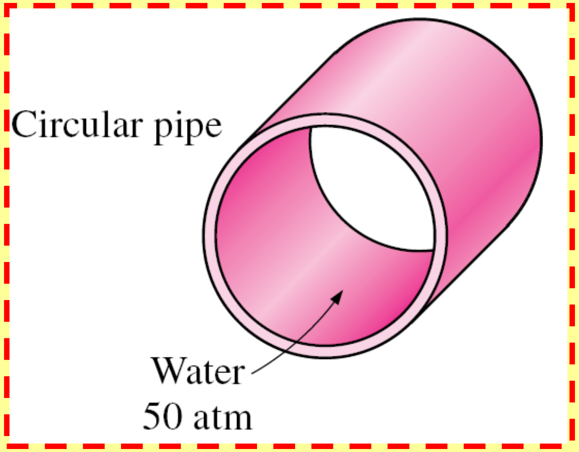


CONVEZIONE NATURALE
Moto dato dalle forze di galleggiamento (si tratta di forze ascensionali che derivano dalle differenze di densità tra le porzioni di fluido, causate dalle variazioni di temperatura nel fluido stesso.



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:

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

h è detto coefficiente di scambio termico per convezione (W/m^2K)

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.

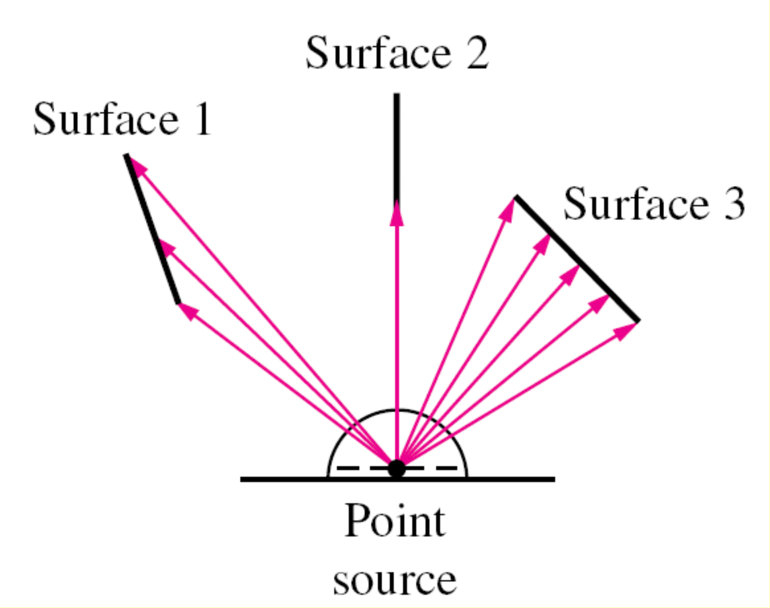
Alcuni valori di h

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

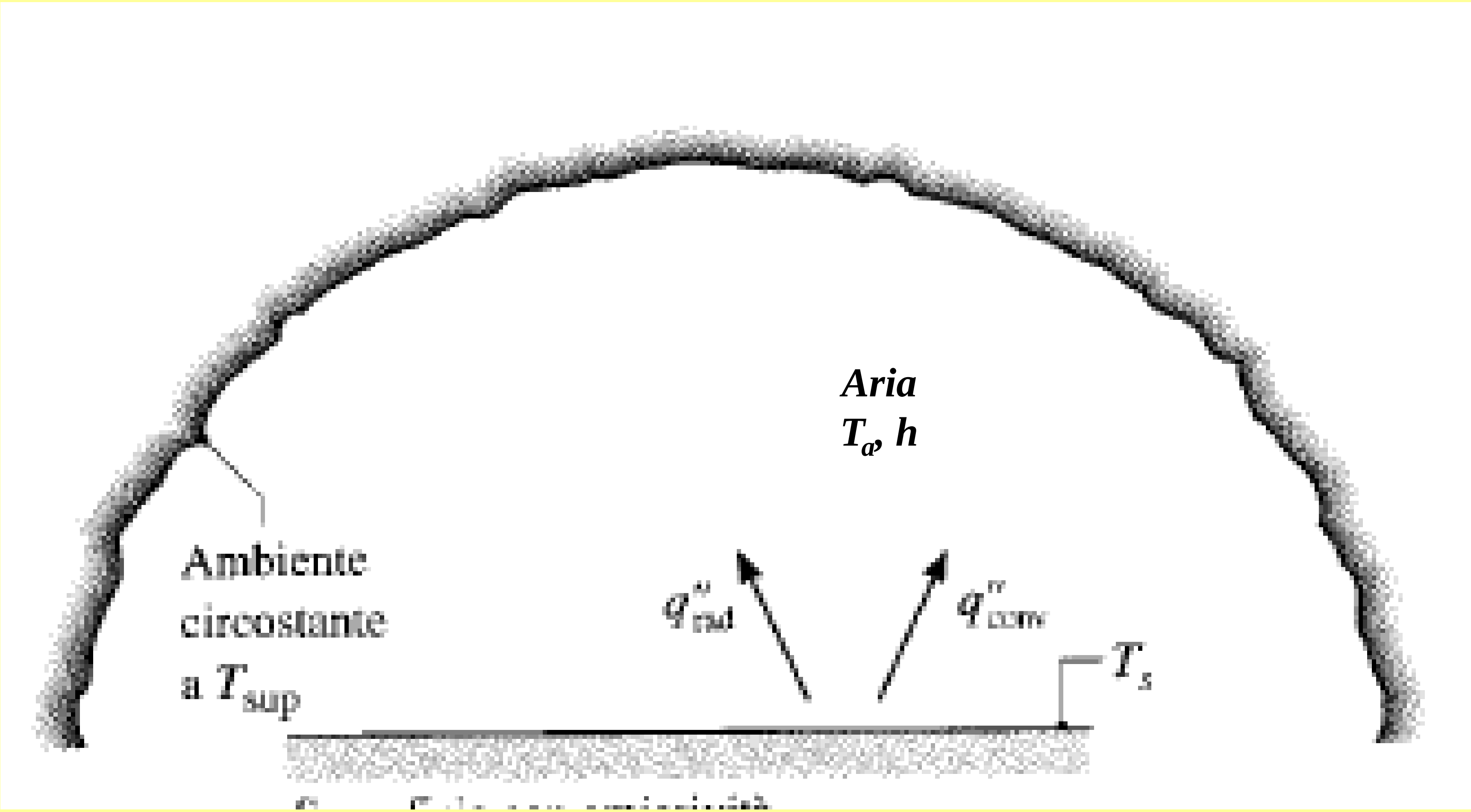
Irraggiamento termico

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:

$E = \sigma T_s^4$ (Legge di Stephan-Boltzmann)

$\sigma = 5.67 \times 10^8 \, (W/m^2K^4)$

Irraggiamento termico

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

Vale la Legge di Stephan-Boltzmann:

$E = \sigma T_s^4$

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

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

$E = \boldsymbol{\varepsilon} \sigma T_s^4$

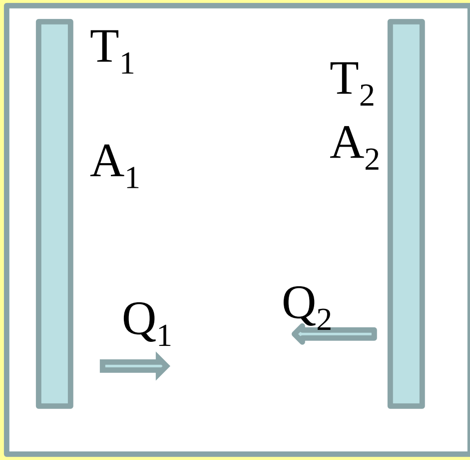
ε **=** emissività della superficie

$\varepsilon < 1$ corpo reale

$\varepsilon = 1$ 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:

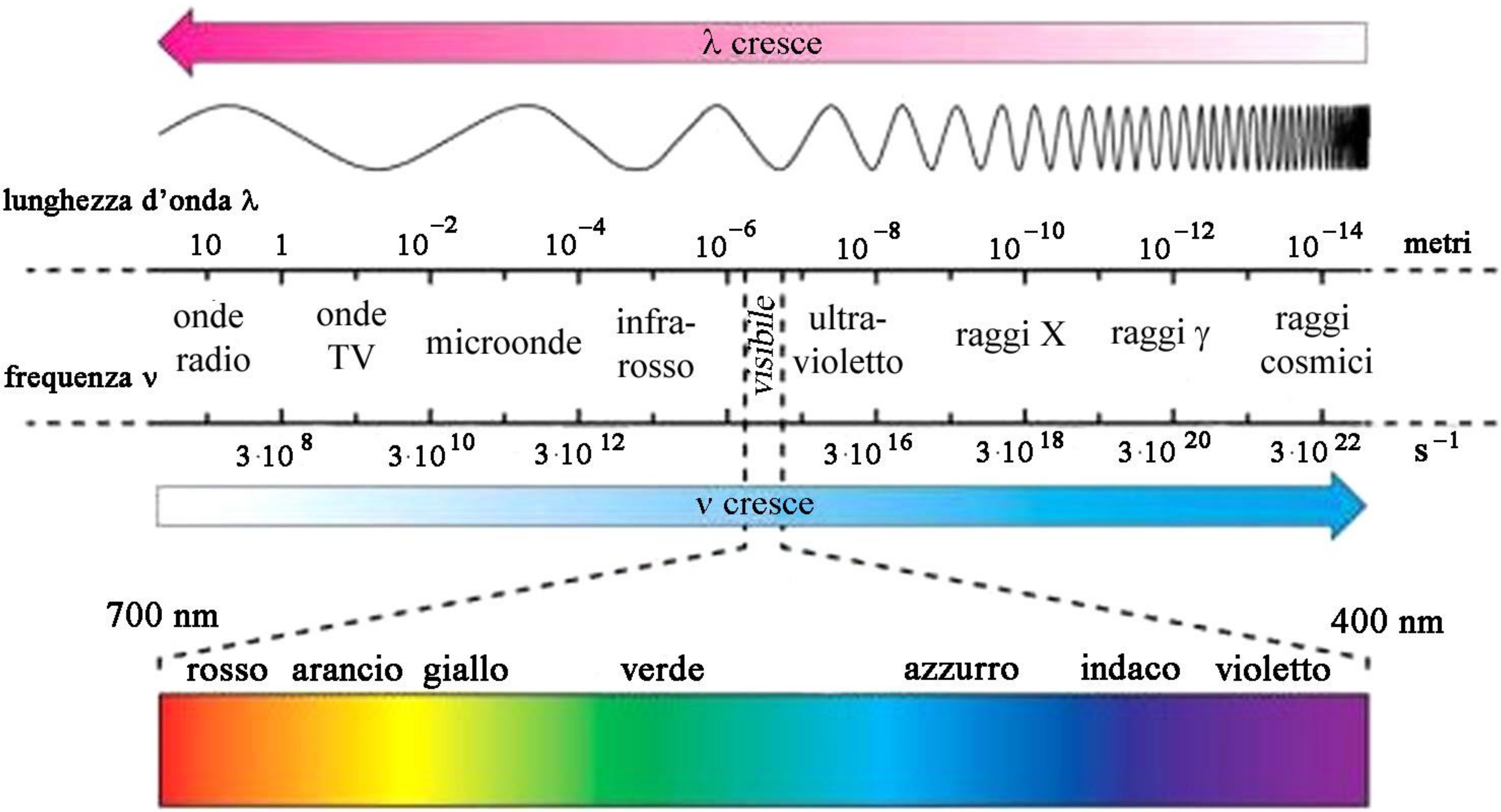


$$\dot{Q}_{1\to 2} = \left(\begin{array}{c}\text{Radiazione emessa}\\ \text{dalla superficie 1}\\ \text{e intercettata dalla}\\ \text{sup.2}\end{array}\right) - \left(\begin{array}{c}\text{Radiazione}\\ \text{emessa dalla sup.2}\\ \text{e intercettata dalla}\\ \text{sup. 1}\end{array}\right)$$

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

Se $A_1 = A_2$ e $\boldsymbol{\varepsilon_1 = \varepsilon_2}$ **ricordando che** $\mathbf{Q = \varepsilon\, \sigma T_s^4}$

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



λ cresce
lunghezza d'onda λ
10
1
10⁻²
10⁻⁴
10⁻⁶
10⁻⁸
10⁻¹⁰
10⁻¹²
10⁻¹⁴
metri
onde radio
onde TV
microonde
infra-rosso
visibile
ultra-violetto
raggi X
raggi γ
raggi cosmici
frequenza ν
3·10⁸
3·10¹⁰
3·10¹²
3·10¹⁶
3·10¹⁸
3·10²⁰
3·10²²
s⁻¹
ν cresce
700 nm
400 nm
rosso
arancio
giallo
verde
azzurro
indaco
violetto

Irraggiamento: leggi fondamentali

Una radiazione elettromagnetica è caratterizzata dai seguenti parametri:

- Lunghezza d'onda λ

- Frequenza ν

-Velocità di propagazione nel mezzo **v**

In generale

Essendo (legge cinematica)

$s = vt$

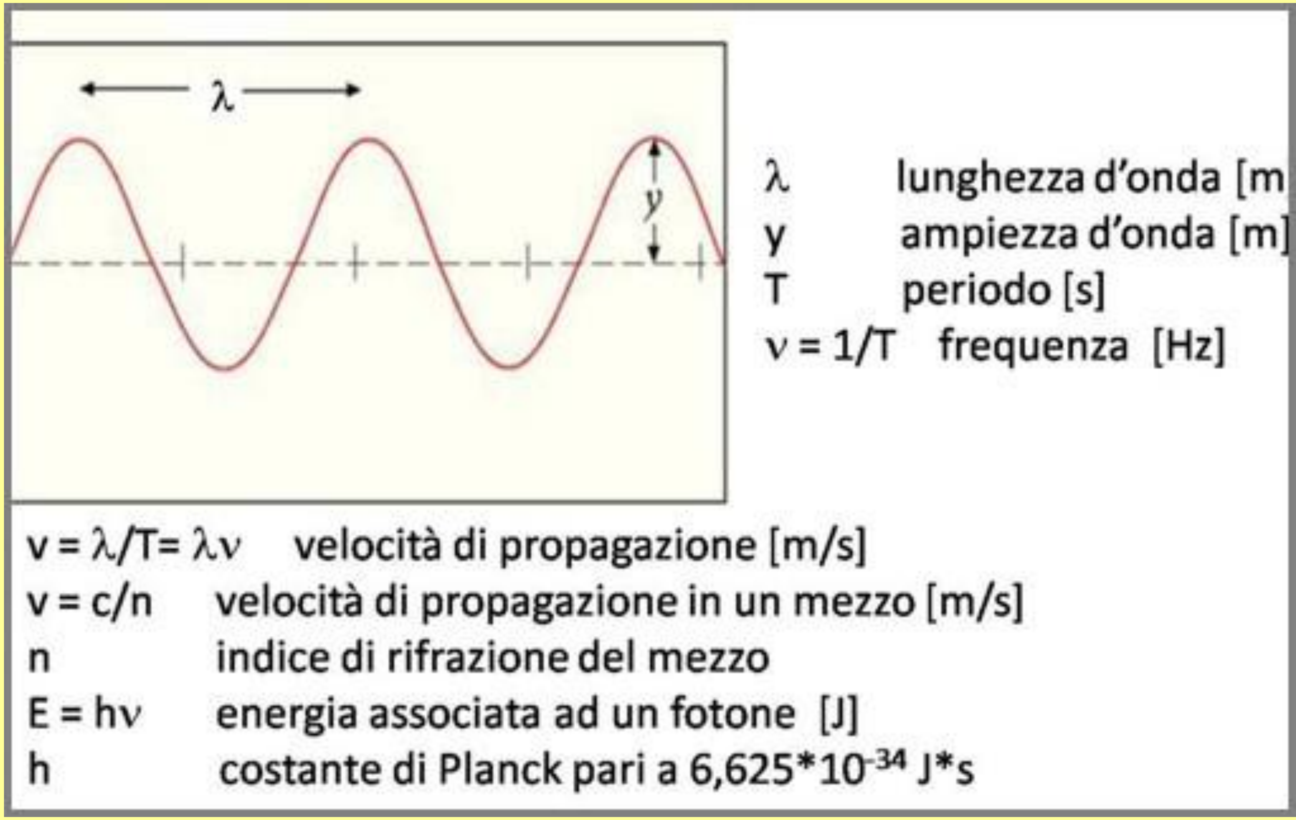
$\lambda = vT$

$v = \lambda/T = \lambda\nu = c/n$

$c = 3.000.000$ km/s

velocità di propagazione

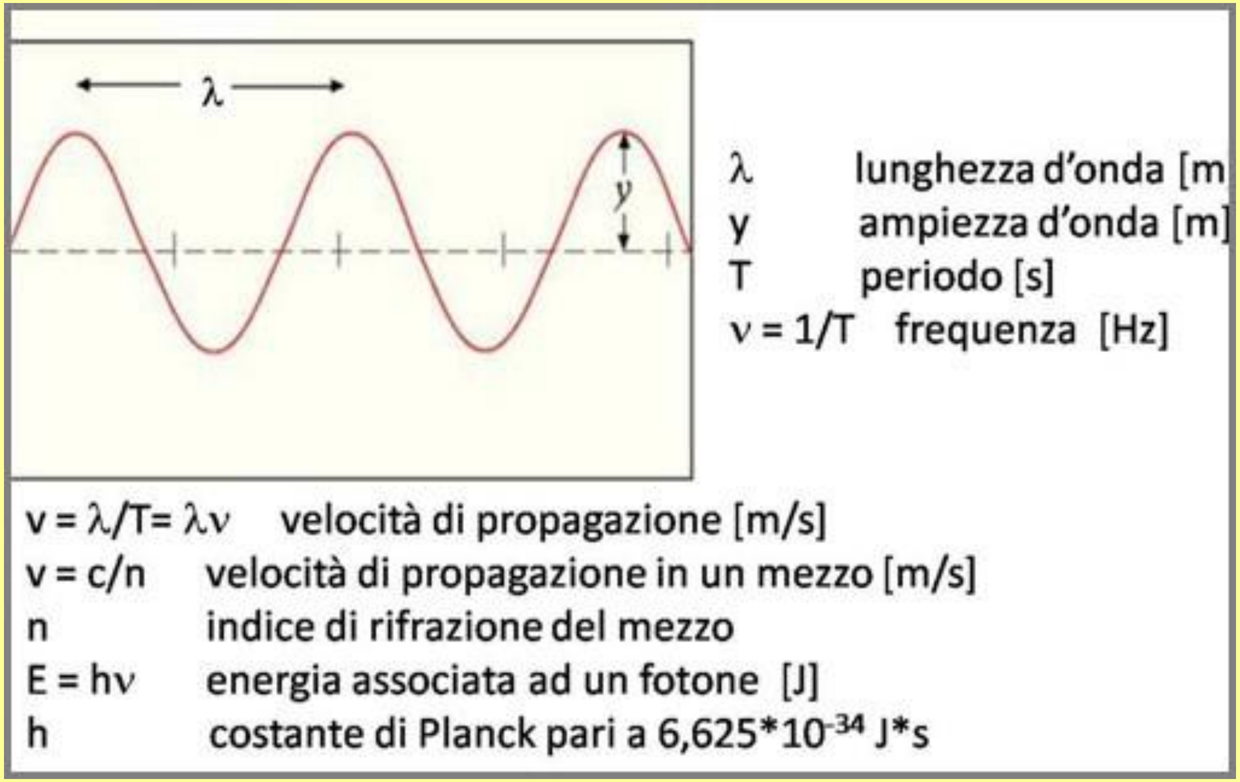
della radiazione nel vuoto.



Irraggiamento: leggi fondamentali

Proprietà:

- **Lunghezza d'onda λ**: distanza minima tra due punti che si trovano nella stessa posizione rispetto all'onda stessa (es. due punti di cresta consecutivi)
- Altezza massima o **ampiezza dell'onda** (m)
- **Periodo T**: intervallo di tempo (s) in cui l'onda si propaga di una distanza pari a λ (oscillazione),
- **Frequenza ν**: numero di cicli o oscillazioni nell'unità di tempo



Interazione con la materia

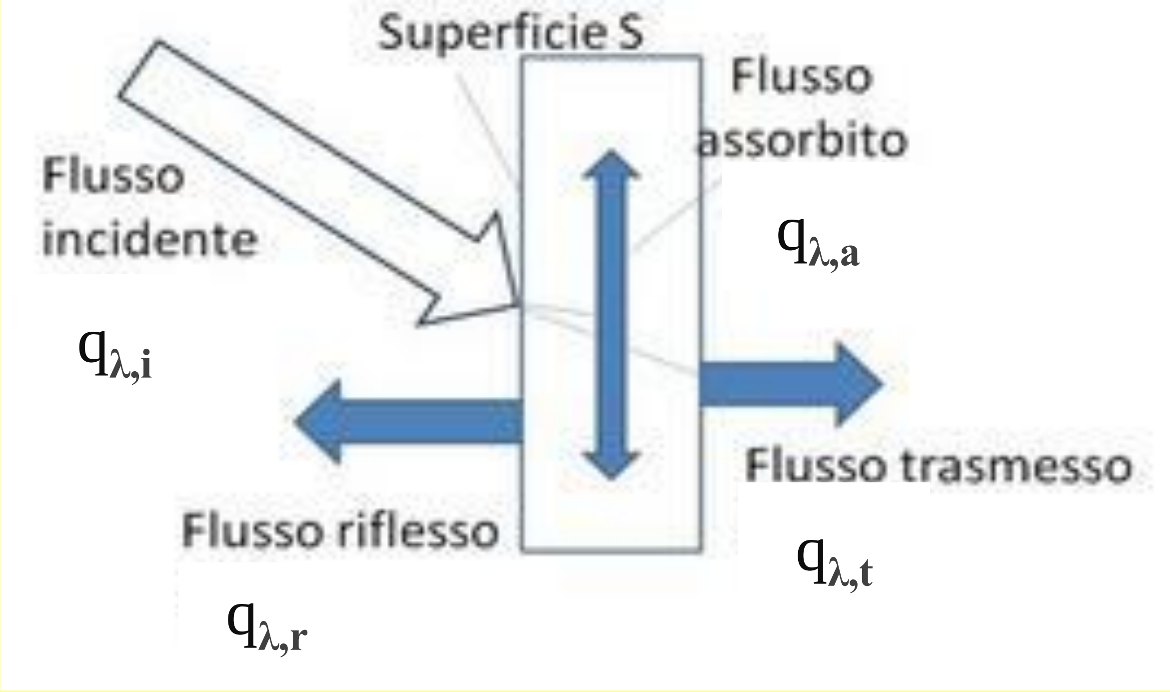
Nel vuoto le radiazioni elettromagnetiche si propagano in modo rettilineo, ma nella materia?

Si consideri una radiazione di data lunghezza d'onda λ, incidente sulla superficie S di un corpo.

In funzione della sostanza che costituisce il corpo e della finitura della superficie, la radiazione incidente si scompone in tre aliquote:

- quella riflessa
- quella assorbita
- quella trasmessa

$q_{\lambda,i} = q_{\lambda r} + q_{\lambda,a} + q_{\lambda,t}$

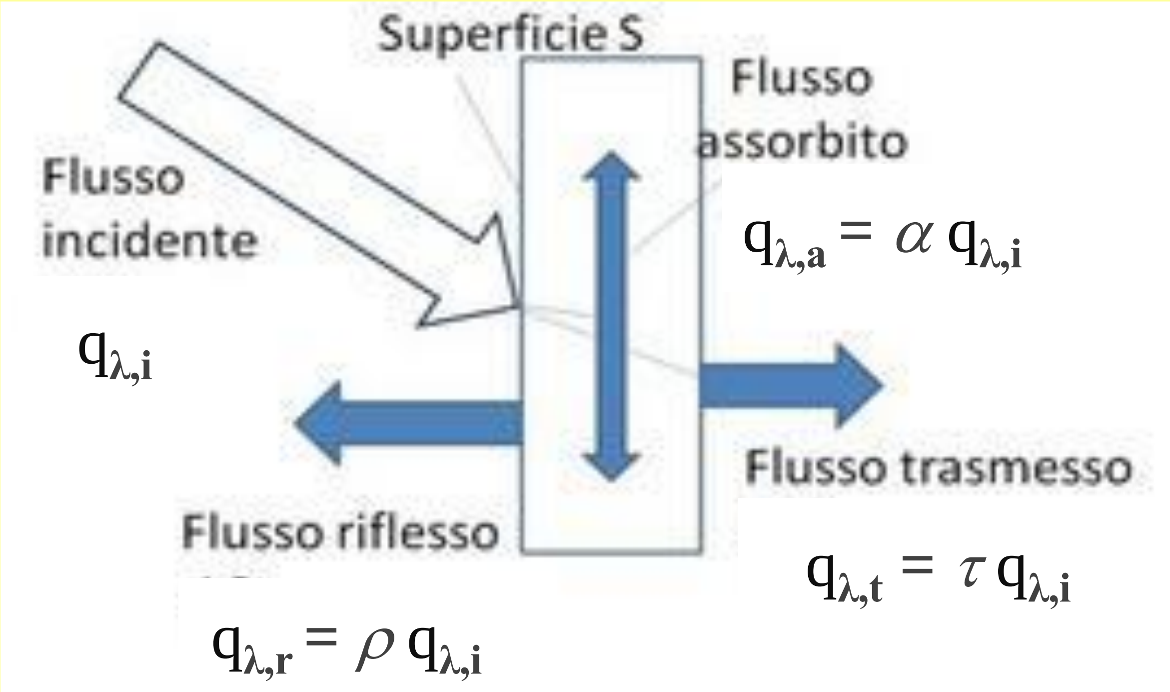


Interazione con la materia

Le tre aliquote di radiazione:
- quella riflessa $q_{\lambda r}$
- quella assorbita $q_{\lambda,a}$
- quella trasmessa $q_{\lambda,t}$

dipendono dai fattori di
- Riflessione ρ
- Assorbimento α
-Trasmissione τ

τ, α, ρ sono legati al tipo di sostanza e alla lunghezza d’onda della radiazione elettromagnetica



Interazione con la materia

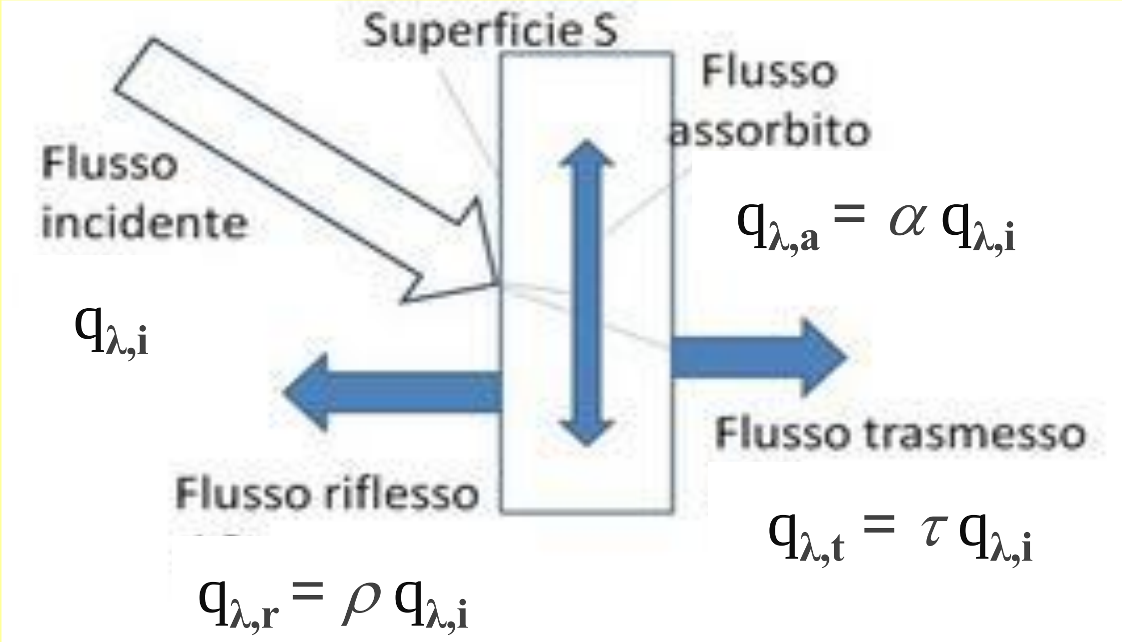
$q_{\lambda,i} = q_{\lambda r} + q_{\lambda,a} + q_{\lambda,t}$

$q_{\lambda,i} = \rho\, q_{\lambda,i} + \alpha\, q_{\lambda,i} + \tau\, q_{\lambda,i}$

Dividendo primo e secondo membro per $q_{\lambda,i}$

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

La somma dei fattori di riflessione, assorbimento e trasmissione è sempre uguale a <u>1</u>.



Corpo nero

I fattori di riflessione ρ assorbimento α e trasmissione τ influenzano il comportamento dei corpi rispetto alle radiazioni elettromagnetiche, al variare della lunghezza d'onda.

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

Vale la Legge di Stephan-Boltzmann:

$E = \sigma T_s^4$

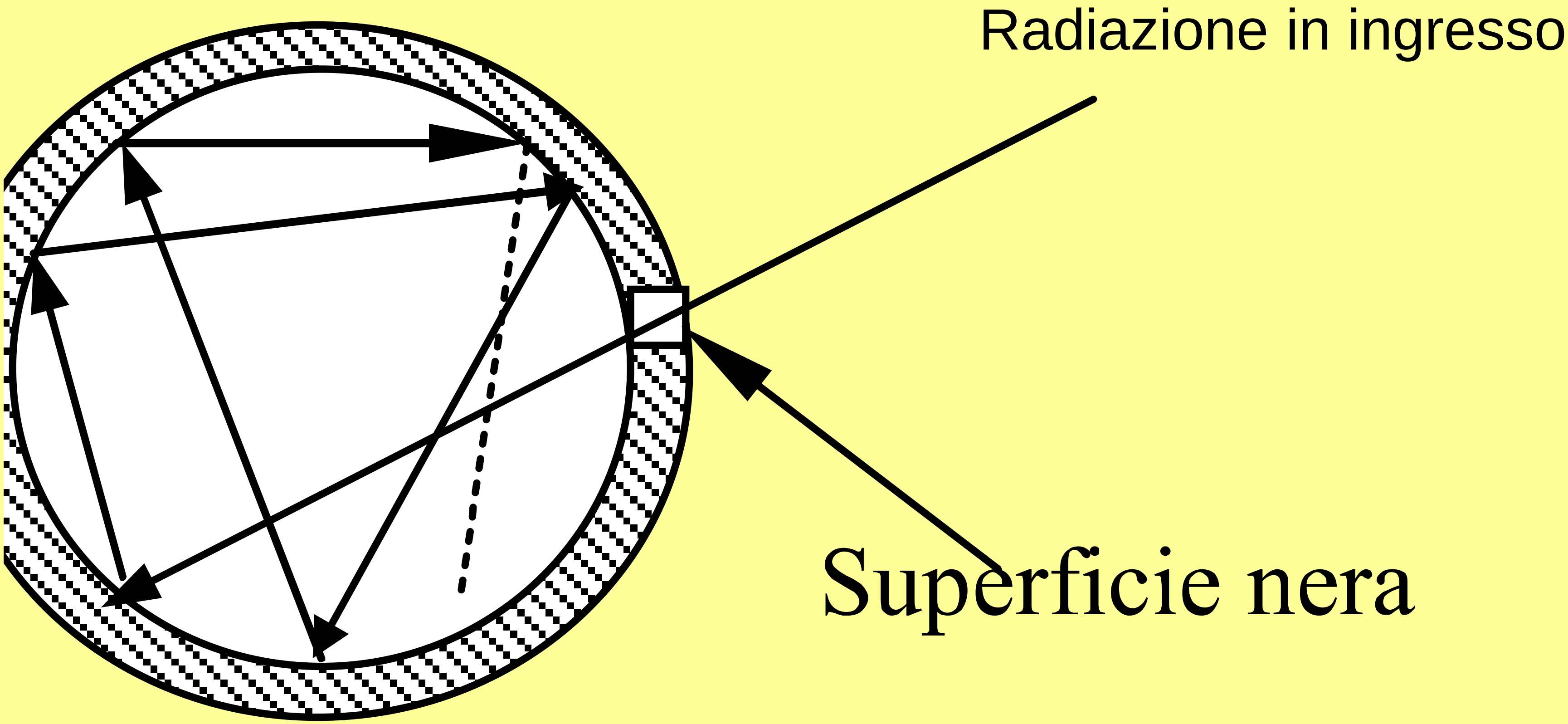
$\sigma = 5.67 \times 10^8 \, (W/m^2K^4)$

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

$E_n = \sigma T_s^4$ corpo nero

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

$E < E_n$


Radiazione in ingresso
Superficie nera

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 **En** quello del corpo nero, cioè σT_s^4

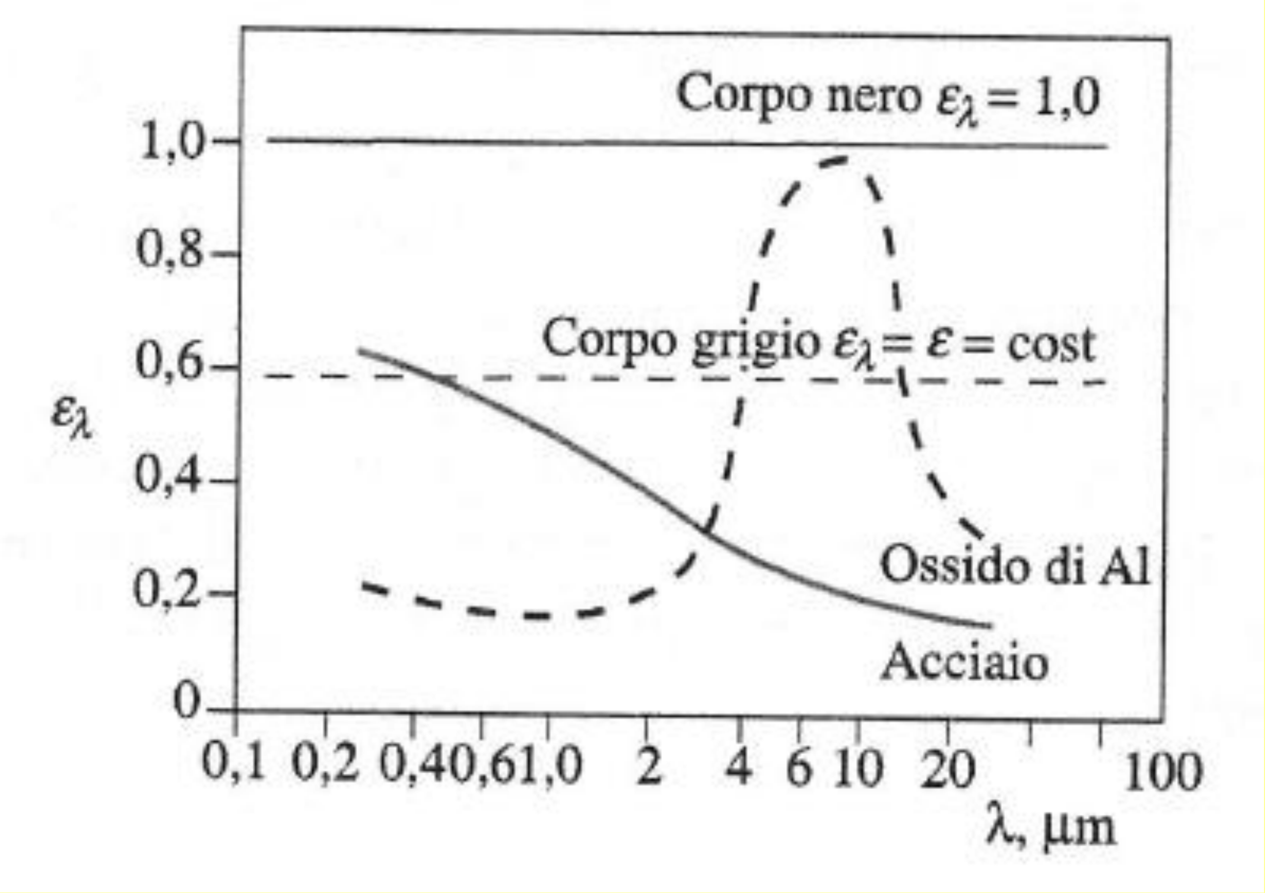
L'emissività di un corpo grigio è

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

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

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

$\boldsymbol{\varepsilon}$ 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 **ε** non dipende dalla lunghezza d'onda ma solo dalla temperatura,
- Un corpo reale emette sempre meno del corpo nero a pari temperatura

Legge di Kirchhoff

$$\frac{E_\lambda}{E_{\alpha,\lambda}} = \frac{\varepsilon_\lambda}{\alpha_\lambda} = 1$$

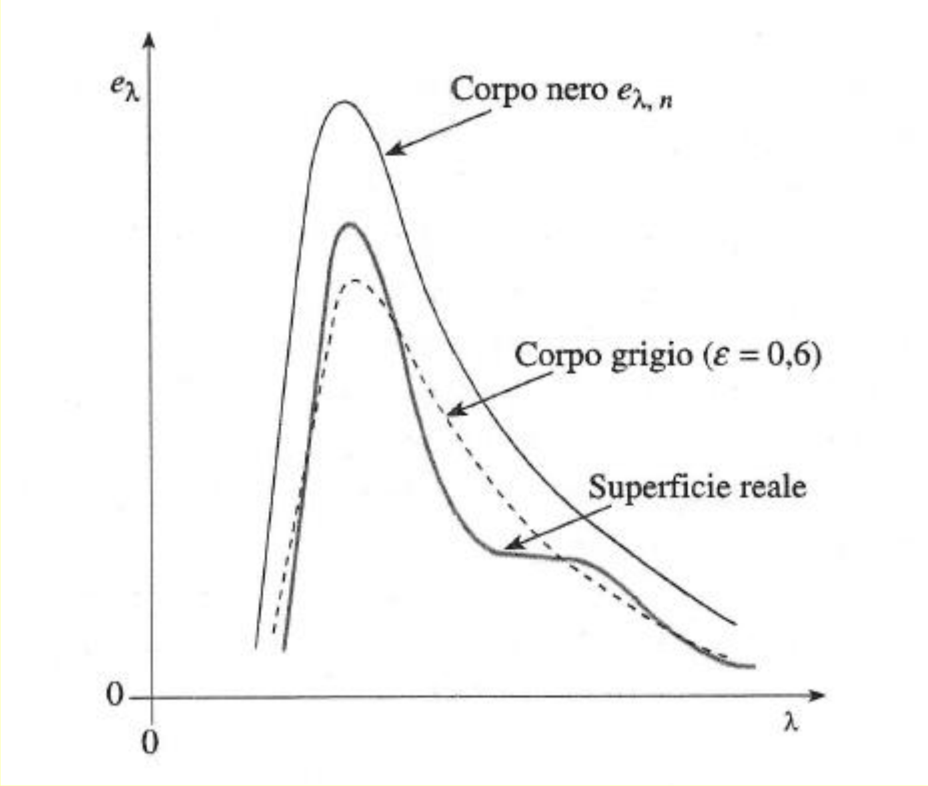
$$E_\lambda = E_{\alpha,\lambda}$$

$$\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$$

$$\varepsilon_\lambda = \alpha_\lambda$$

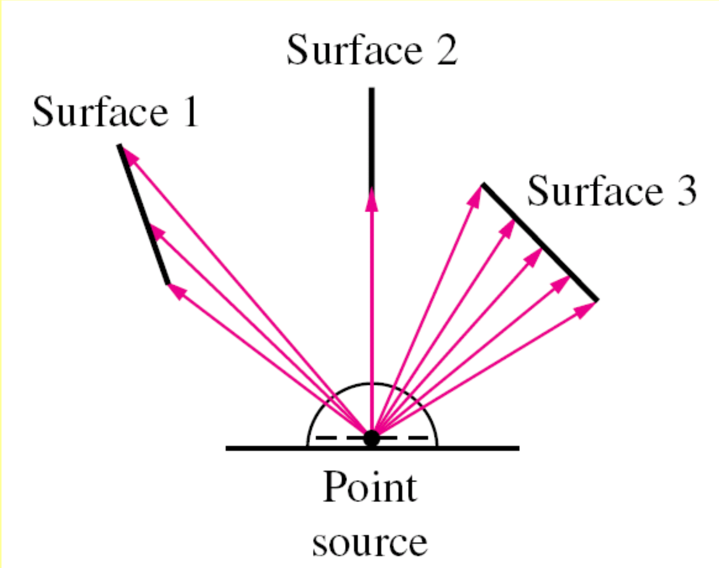
Corpi reali

- 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.



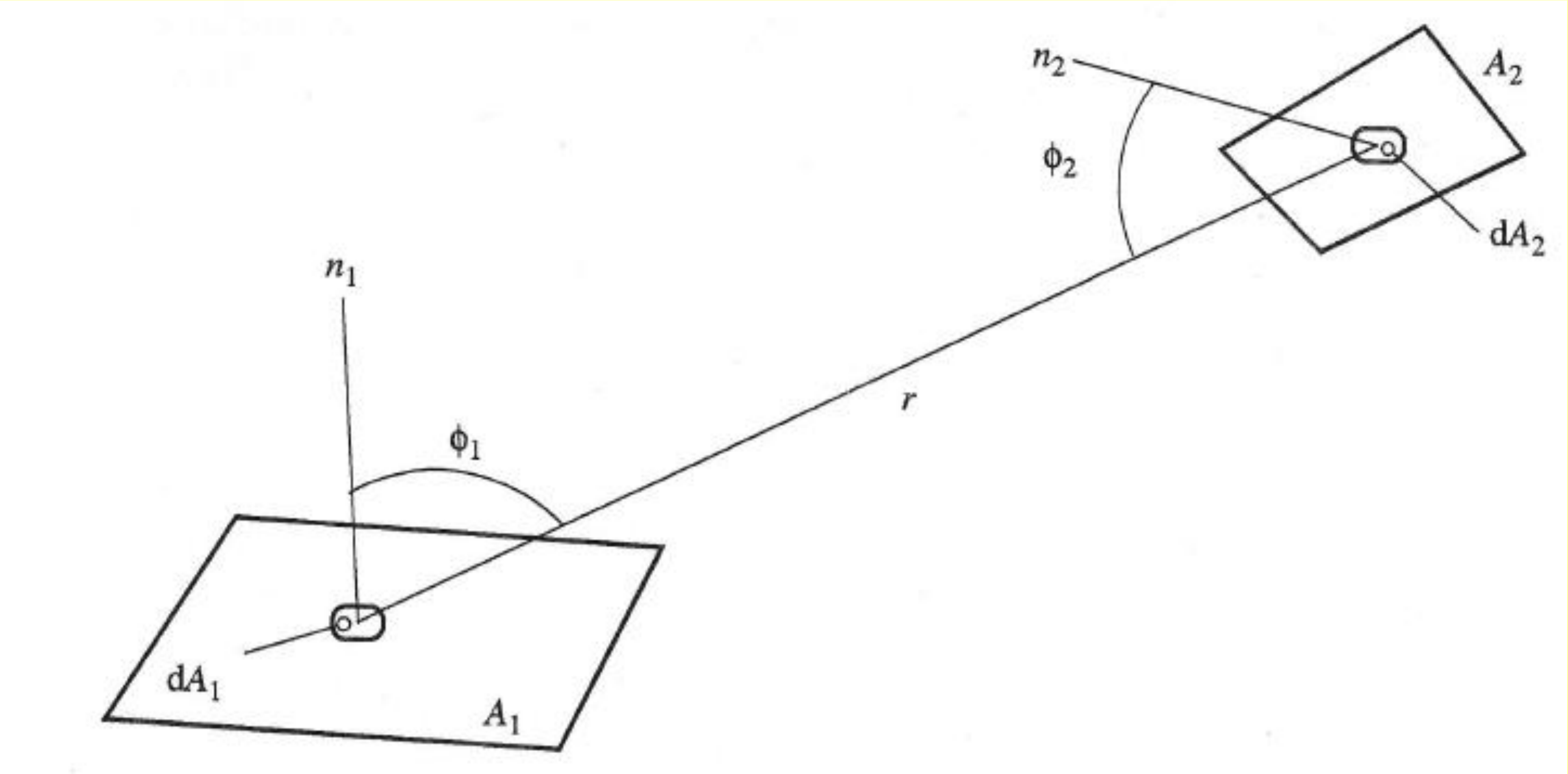
- *Il fattore di forma* tiene conto dell'effetto dell'orientamento, è una grandezza geometrica ed è indipendente dalle proprietà delle superfici e dalle temperature.

- Il fattore di forma tra una superficie i a 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 RECIPROCITÀ

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

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

Pertanto:

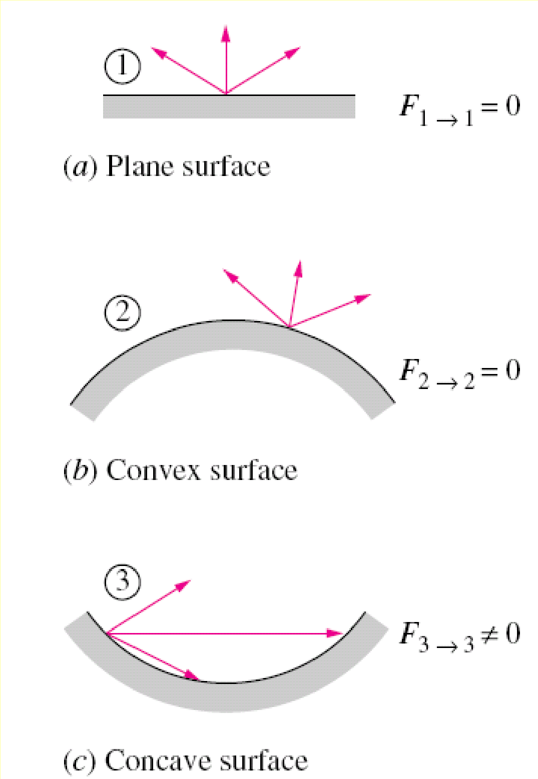
il flusso netto scambiato tra due superfici a temperature T_1 e T_2 è:

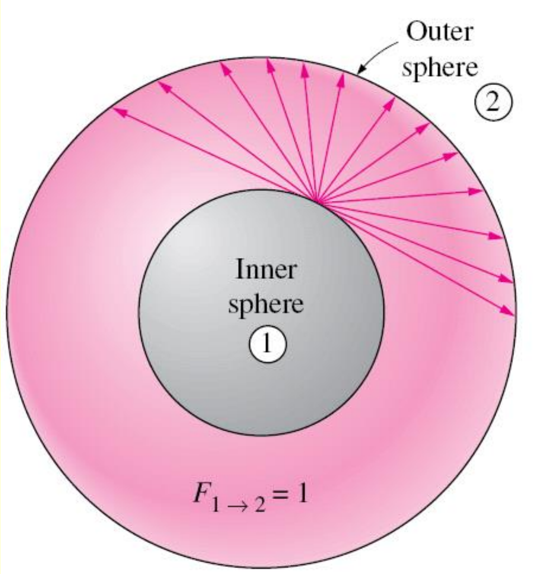
Essendo $Q_{1\rightarrow 2} = F_{12} A_1 E_{n1}$ $Q_{2\rightarrow 1} = F_{21} A_2 E_{n2}$

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

- *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*.
  - $F_{ij} = 0$ — le due superfici non si "vedono" tra di loro
  - $F_{ij} = 1$ — la superficie *j* circonda completamente la superficie *i*.





Relazioni tra i fattori di forma

- Relazioni fondamentali:
  - the relazione di reciprocità,
  - the regola della somma o additività,

Relazione di Reciprocità

- Prima abbiamo visto che la coppia di fattori di forma $F_{1\,2}$ 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.

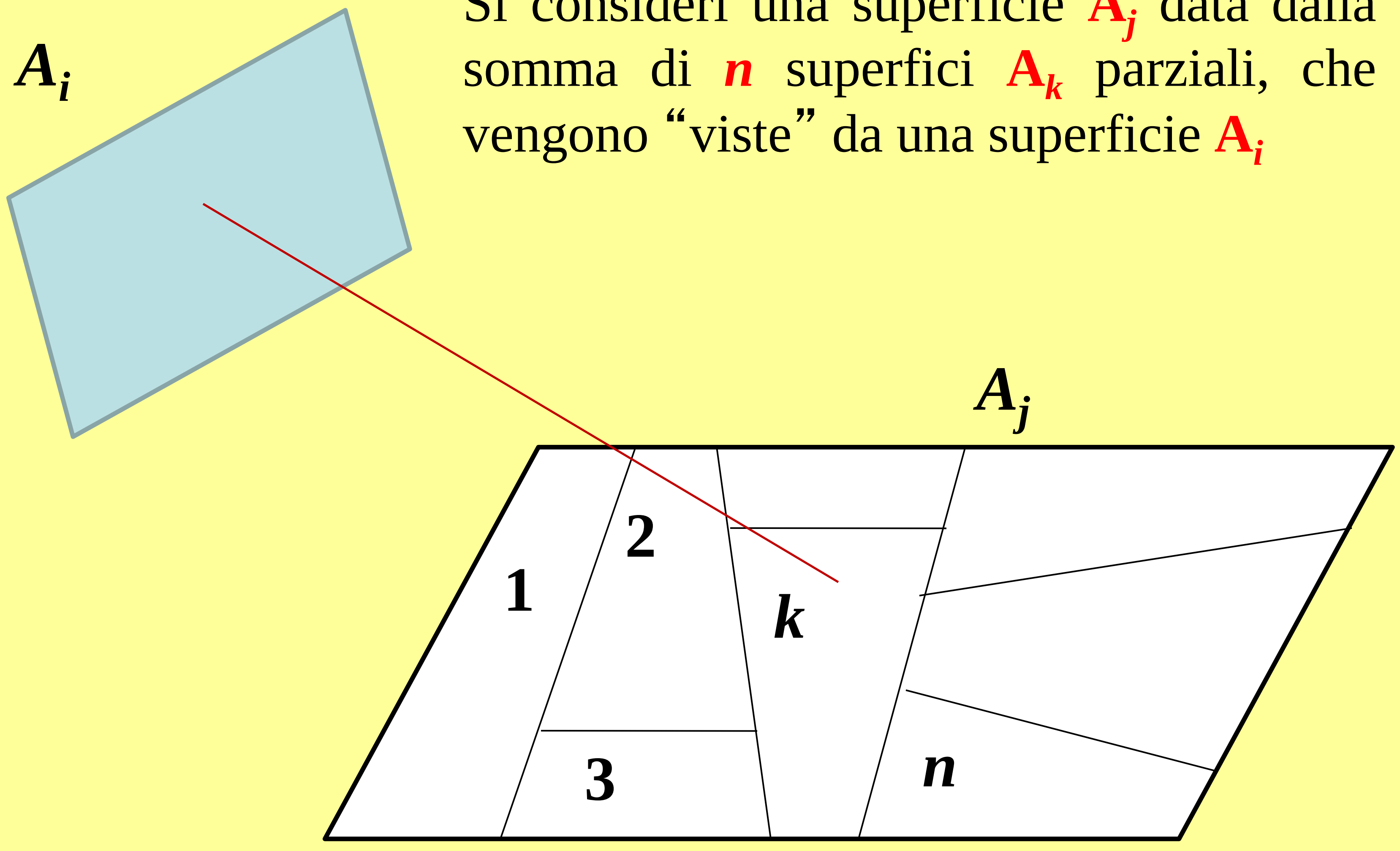
- Si noti che:

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

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

Additività

Si consideri una superficie **A_j** data dalla somma di ***n*** superfici **A_k** parziali, che vengono "viste" da una superficie **A_i**



Additività

Se una superficie $\mathbf{A}_j$ è data dalla somma di ***n*** superfici $\mathbf{A}_k$ parziali, che vengono "viste" da una superficie $\mathbf{A}_i$ sussiste la seguente proprietà di additività dei fattori di forma:

$$F_{ij} = \sum_{k=1}^{n} F_{ik}$$

Quindi moltiplicando primo e secondo membro per $\mathbf{A}_i$

$$A_i F_{ij} = A_i \sum_{k=1}^{n} F_{ik} = \sum_{k=1}^{n} A_i F_{ik}$$

Per il teorema di reciprocità:

$$A_i F_{ij} = \sum_{k=1}^{n} A_i F_{ik} = \sum_{k=1}^{n} A_k F_{ki} \qquad A_i F_{ij} = \sum_{k=1}^{n} A_k F_{ki}$$

Additività

Ne segue che il generico fattore di forma è dato da:

$$F_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{n} A_k F_{ik}}{A_i}$$

Sempre per il teorema di reciprocità:

$$F_{ji} = \frac{\sum_{k=1}^{n} A_k F_{ki}}{A_j}$$