

	Meccanismo	Equazione generale
Conduzione	Collisioni molecolari	$\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dx}$
Convezione	Diffusione molecolare	$\dot{Q} = hA(T_s - T_\infty)$
Radiazione	Fotoni	$\dot{Q} = A\varepsilon\sigma(T_s^4 - T_\infty^4)$
Evaporazione	Cambiamento di fase	$\dot{Q} = \dot{m}_w H$

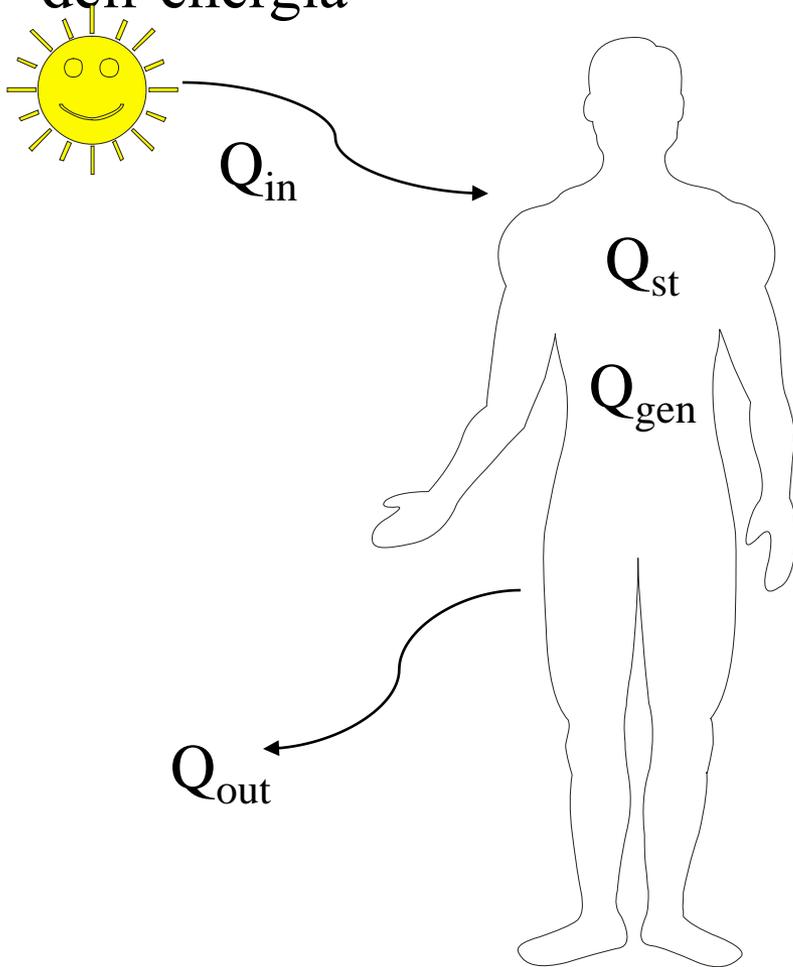
$Q \rightarrow$ Calore (Joule)

$\dot{Q} \rightarrow$ Calore prodotto nell'unita' di tempo (Joule s⁻¹ o Watt)

$\ddot{Q} \rightarrow$ Flusso di calore (Joule m⁻² s⁻¹)

$\dddot{Q} \rightarrow$ Flusso volumetrico (Joule m⁻³ s⁻¹)

Prima legge della termodinamica: Conservazione dell'energia

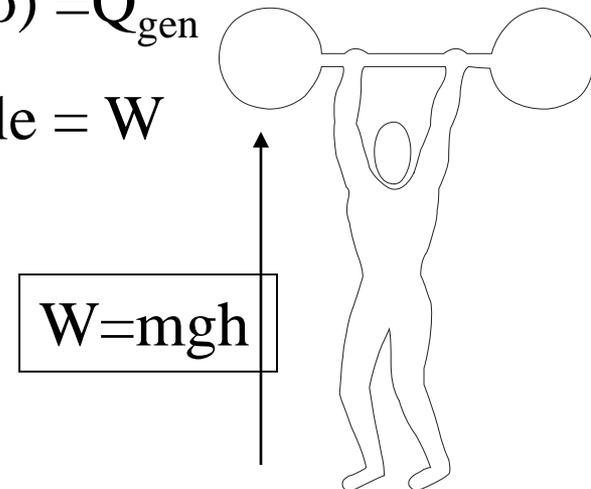


In un volume V:

Calore immagazzinato (aumento di energia interna) = Q_{st} , (es. Glicogeno o grasso)

Calore generato (dovuto al metabolismo) = Q_{gen}

Lavoro utile = W



$$Q_{st} + Q_{in} + Q_{gen} = Q_{out} + W$$

$$Q_{st} = Q_{in} - Q_{out} + Q_{gen} - W$$

Consideriamo un sistema con $W=0$. In questo caso

$$Q_{st} = Q_{in} - Q_{out} + Q_{gen}$$

Per un sistema passivo (che non genera energia) all'equilibrio (non aumenta la temperatura) possiamo scrivere

$$\dot{Q}_{out} = \dot{Q}_{in}$$

Per un corpo sano ($Q_{st}=0$) a riposo ($W=0$)

$$\dot{Q}_{out} = \dot{Q}_{in} + \dot{Q}_{gen}$$

Consideriamo le perdite di calore da un uomo standard nudo e a riposo in determinate condizioni ambientali.

Peso del uomo= 68 kg

BMR=86 J s⁻¹

Area esposta = 1.4 m²

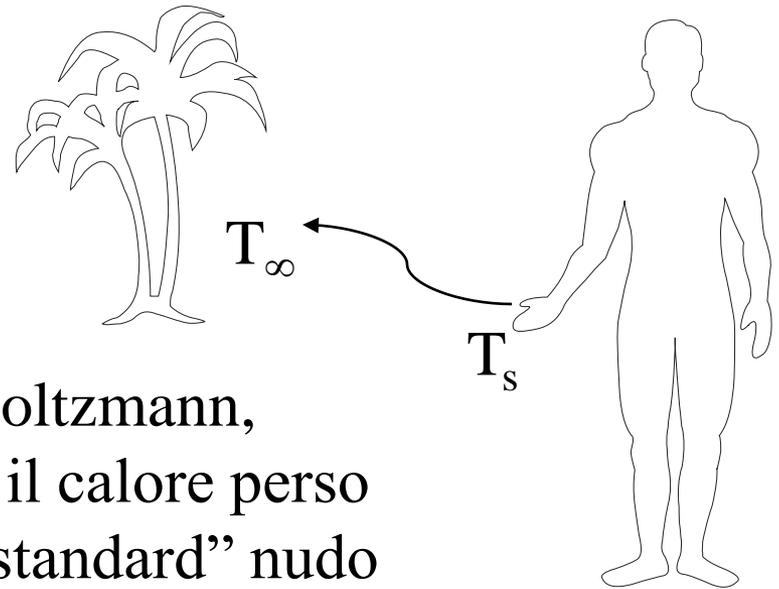
velocita' dell'aria= 0.5 ms⁻¹

temperatura della pelle= 33 ° C

temperatura esterna= 29 ° C



RADIAZIONE



Partendo dall'equazione di Stefan-Boltzmann, possiamo scrivere un'equazione per il calore perso per radiazione da un corpo umano “standard” nudo con area radiante A_r e emissività ε

$$\dot{Q}_r = \sigma A_r \varepsilon (T_s^4 - T_\infty^4) \quad \boxed{\text{T in Kelvin!}}$$

L'emissività del corpo è 0.97 per lunghezze d'onda da 0.1 a 100 μm (infra-rosso), A_r è 1.4 m^2 e $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$. Per $T_s = 33 + 273 \text{ K}$ e $T_\infty = 29 + 273 \text{ K}$,

$$4.7 \text{ W/K/m}^2 \quad \dot{Q}_r = 34.6 \text{ J/s}$$

Corrispondente a
circa 40% del
BMR

Quando la differenza di temperatura tra due superfici e' piccola rispetto ai valori assoluti :

$$(T_s^4 - T_\infty^4) = (T_s^3 + T_s^2 T_\infty + T_s T_\infty^2 + T_\infty^3) (T_s - T_\infty)$$

puo' essere considerato costante per temperature intorno a 30 ° C

Il calore perso per radiazione puo' essere anche espresso come

$$\dot{Q}_r = k_r A_r \varepsilon (T_s - T_\infty)$$

T puo' essere in °C

Si può mostrare che k_r e' circa uguale a $6.3 \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

$$k_r = \sigma * 4 * T^3 \text{ per } T = 273 + 30$$

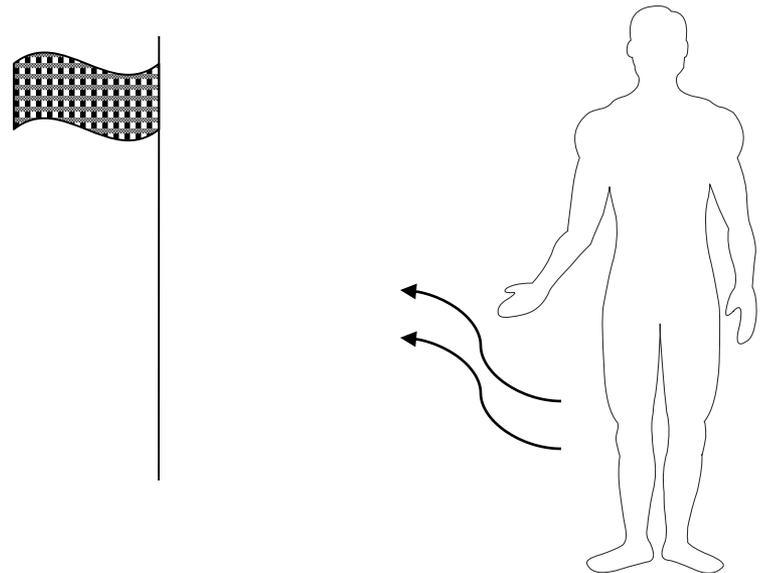
CONVEZIONE

Le perdite convettive dipendono dalla velocità dell'aria.
L'equazione generale viene dalla legge di raffreddamento di Newton.

$$\dot{Q}_c = k_c A_c (T_s - T_a)$$

dove k_c è il coefficiente di trasferimento convettivo, T_a è la temperatura dell'ambiente e A_c è l'area del corpo soggetto a convezione.

(spesso il termine per convezione forzata viene incorporato in questa equazione)



Nel caso di un corpo nudo soggetto a convezione libera,

$$k_c \cong 2.46 \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

Per un corpo nudo soggetto a convezione forzata, si puo' fare riferimento a valori sperimentali disponibili in letteratura.

k_c in $\text{W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	Condizioni
$6.51v^{0.67}$	In piedi, con flusso d'aria di traverso
$12.09v^{0.5}$	Supino con flusso parallelo
$2.95v^{0.72}$	In piedi con flusso parallelo
$7.44v^{0.67}$	Seduto con flusso verticale

v e' la velocita' in m s^{-1}

Calcoliamo la perdita di calore di un uomo standard nudo per convezione forzata in presenza di vento leggero

$$v=0.5 \text{ ms}^{-1}, A_c=1.4 \text{ m}^2, T_s = 33^\circ \text{ C e } T_a = 29^\circ \text{ C}$$

$$k_c = 6.51 * 0.5^{0.67} = 4.09 \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\dot{Q}_c = 4.09 * 1.4 * 4 = 22.9 \text{ Js}^{-1}$$

Circa 27% del BMR

CONDUZIONE

In questo esempio, l'unica zona dell'uomo in contatto con un solido e' la pianta dei piedi, e le perdite sono minime.

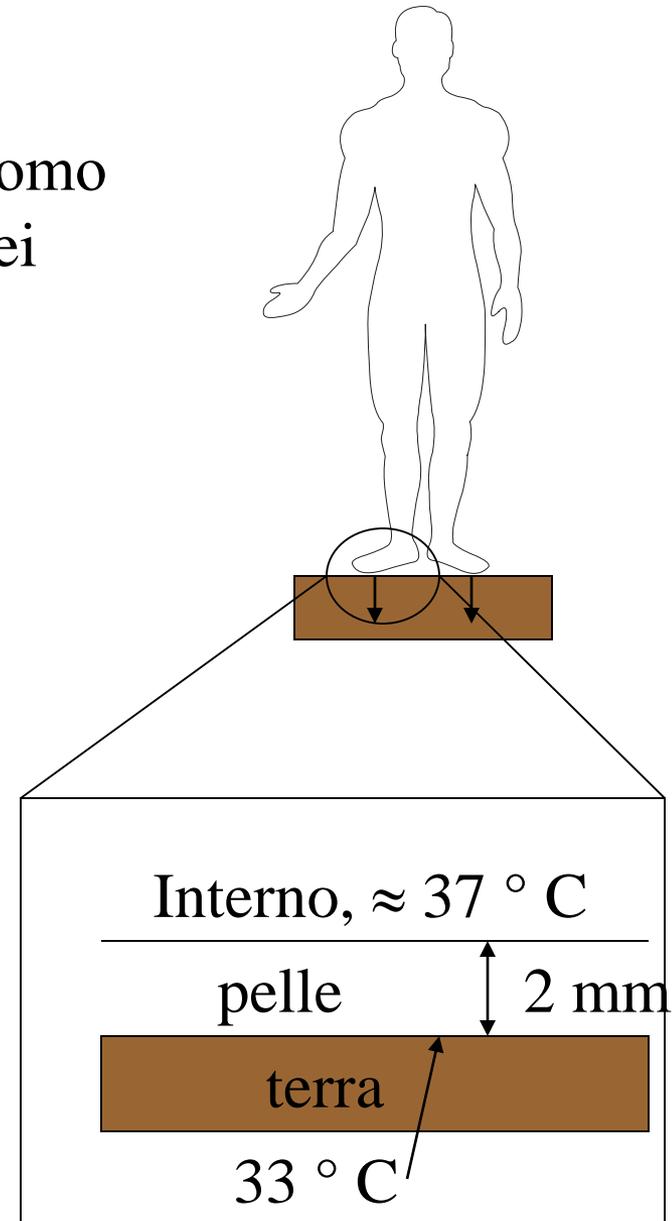
k della pelle $\approx 0.5 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$

Spessore della pelle $\approx 2 \text{ mm}$

Area di contatto $\approx 50 \text{ cm}^2$

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{cond} &= -k_{cond} A_{cond} \frac{dT}{dx} \\ &= \frac{0.5 * 0.005 * (37 - 33)}{0.002} = 5 \text{ J s}^{-1}\end{aligned}$$

6% del BMR



PERDITE PER EVAPORAZIONE: dipendono dall'umidità dell'ambiente

- **DIFFUSIONE** di acqua attraverso la pelle dovuto alla differenza di concentrazione di acqua tra esterno e interno del corpo. **E' una perdita insensibile.**
- **SUDORAZIONE:** dovuto alla produzione di liquidi nelle ghiandole sudorifere (e' insensibile perche evapora)
 - ◆ Sensibile: dovuto alla variazione di temperatura tra aria inspirata ed espirata
 - ◆ Latente (insensibile): dovuto alla variazione di umidità tra aria inspirata ed espirata
- **RESPIRAZIONE**

DIFFUSIONE

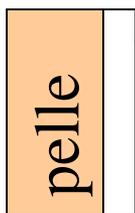
Tipicamente la pelle “traspira” circa 350 ml di acqua al giorno.
Per far evaporare questa quantità di acqua ci vogliono

$$\dot{Q}_d = \frac{350 \cdot 2423000}{1000 \cdot 24 \cdot 3600} = 9.8 \text{ Js}^{-1} \quad \left(\dot{Q} = \dot{m}_w H \right) \quad \boxed{11\% \text{ del BMR}}$$

H e' il calore latente di evaporazione dell' acqua a circa 30 °C (2423 kJ kg⁻¹).

La quantità di acqua eliminata per diffusione dipende dalla differenza tra la pressione di vapore d'acqua sulla pelle e quella dell'ambiente. Un'equazione empirica per il calore perso e'

$$\dot{Q}_d = 3.05 \cdot 10^{-3} A_n (P_s - P_a)$$



A
velo d'acqua, pressione di vapore a 33 °C = P_s (5000 Pascal)

pressione di vapore nell'ambiente, P_a

SUDORAZIONE

La sudorazione e' uno dei meccanismi principali per eliminare il calore in eccesso. L'evaporazione del sudore in un ambiente asciutto smaltisce circa 2.423 kJ per ogni kg di acqua. Se \dot{m}_w e' la velocita' di uscita di sudore,

$$\dot{Q}_s = \dot{m}_w 2423000 \quad \text{Js}^{-1}$$

In un ambiente umido, il flusso di calore dipende sia dalla velocita' dell'aria che dalle pressioni parziali dell'acqua alla superficie della pelle e dell'aria.

$$\dot{Q}_s = k_s A_w (P_s - P_a)$$

In questo esempio, relativo a un uomo a riposo, non ci sono perdite di calore per evaporazione del sudore.

RESPIRAZIONE

♦ **SENSIBILE**: dovuta alla variazione di temperatura tra aria inspirata ed espirata

♦ **LATENTE**: dovuta alla variazione di umidità tra aria inspirata ed espirata

SENSIBILE: E' semplicemente la differenza di energia termica tra aria ispirata ed espirata..

$$\dot{Q}_{se} = \dot{m}_a C_a (T_{es} - T_{is}) + \dot{m}_w C_w (T_{es} - T_{is})$$

Il calore specifico dell'aria e' $1050 \text{ J kg}^{-1}\text{°C}^{-1}$ mentre per acqua e' $4200 \text{ J kg}^{-1}\text{°C}^{-1}$. T_{es} e' circa 37 °C e T_{is} e' 29 °C . In questo caso consideriamo che l'aria inalata e' asciutta, per cui $\dot{m}_w=0$

$$\dot{m}_a = 1.2 \cdot 10^{-4} \text{ Kg s}^{-1}$$

$$\dot{Q}_{se} = 1.2 \cdot 10^{-4} \cdot 1050 \cdot 8 = 1.01 \text{ J s}^{-1}$$

1.2% del BMR

Calore **LATENTE** di evaporazione dovuto al evaporazione di acqua dei polmoni nel aria espirata

$$\dot{Q}_{la} = H_w (\dot{W}_{out} - \dot{W}_{in})$$

H_w e' il calore latente dell'acqua a 37 °C (circa 2423 kJ kg⁻¹),
e \dot{W}_{out} e \dot{W}_{in} sono rispettivamente la massa di acqua espirata
e inspirata per secondo.

Se l'aria e' asciutta, $\dot{W}_{in} = 0$. L'aria espirata e' invece
praticamente satura d'acqua.

$$\dot{W}_{out} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ kg s}^{-1}, \quad \dot{Q}_{la} = 12 \text{ J s}^{-1}$$

14% del BMR

Adesso vediamo la somma totale di perdite in J s^{-1}

$$\dot{Q}_r + \dot{Q}_c + \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_d + \dot{Q}_s + \dot{Q}_{la} + \dot{Q}_{se} = \dot{Q}_{Tot}$$

$$34.6 + 22.9 + 5 + 9.8 + 0 + 1.2 + 12 = 85.5 \text{ J s}^{-1}$$

Per un corpo all'equilibrio, senza "input" di energia, che non aumenta di peso o temperatura, il calore perso deve essere uguale al metabolismo.

$$\dot{Q}_{Tot} = \dot{Q}_{BMR}$$

Per un corpo umano che effettua lavoro (es. esercizio fisico) possiamo scrivere:

$$\dot{Q}_{Tot} = \dot{Q}_{BMR} - \dot{W} = \dot{Q}_{BMR} - \eta \dot{Q}_{BMR} = \dot{Q}_{BMR} (1 - \eta)$$

η e' l'efficienza, che ha un valore massimo di 25%