

CdL Professioni Sanitarie
A.A. 2012/2013

Unità 5: Energia, Lavoro e Calore

- Introduzione al concetto di energia
 - Energia cinetica, potenziale e meccanica
- Lavoro e calore
 - Forze non-conservative e lavoro: teorema lavoro-energia
 - Potenza
 - Trasformazione dell'energia meccanica in calore: I Principio della Termodinamica
- Termometria e calorimetria

- Temperatura e sua misura: grado Celsius e Kelvin
- Calore specifico ed equivalente meccanico del calore, kilocaloria
- Temperatura di equilibrio
- Calore latente

- Applicazione: macchine termiche e metabolismo

- Cenni sulla propagazione/trasmissione del calore
 - Conduzione, convezione ed irraggiamento
 - Applicazione: termoregolazione del corpo umano

CdL Professioni Sanitarie
A.A. 2012/2013

Energia cinetica, potenziale e meccanica

Consideriamo un corpo in caduta libera sotto l'azione della forza di gravità (in prossimità della superficie terrestre):

$$v = v_0 - gt \quad (t_0 = 0)$$

$$y = y_0 + v_0 t - \frac{1}{2}gt^2 \quad (t_0 = 0)$$

Dalla prima equazione si ottiene: $t = (v_0 - v)/g$, che sostituito nella seconda dà:

$$y = y_0 + v_0 \frac{v_0 - v}{g} - \frac{1}{2}g \frac{(v_0 - v)^2}{g^2} = y_0 + \frac{v_0^2 - v^2}{2g}$$

da cui:

$$\frac{1}{2}v^2 + gy = \frac{1}{2}v_0^2 + gy_0 \quad \implies \quad \frac{1}{2}mv^2 + mgy = \frac{1}{2}mv_0^2 + mgy_0$$

La quantità $mv^2/2 + mgy$ si conserva. Definiamo:

$$T = \frac{1}{2}mv^2$$

energia cinetica

$$U = mgy$$

energia potenziale gravitazionale

$$E = T + U$$

energia meccanica

L'energia è una grandezza derivata. La sua **unità di misura** nel SI è:

$$[E] = [U] = [T] = [mv^2] = \text{kg (m/s)}^2 = \text{N m} = \text{Joule (J)}$$

Altra unità: 1 elettronvolt (eV) = 1.6×10^{-19} Joule (J)

Il moto di corpi sotto l'azione della forza di gravità è caratterizzato dal fatto che esiste una quantità, detta **energia meccanica**, che si conserva:

$$T + U = T_0 + U_0$$

Tutte le forze per le quali si può definire una energia potenziale e si possono scrivere equazioni di conservazione sono dette **forze conservative**. L'**energia potenziale dipende soltanto dalla posizione** e non dalla velocità del corpo.

Il Principio di conservazione dell'energia meccanica è utile quando si deve calcolare la velocità ad un'altezza y una volta che siano note le condizioni iniziali (y_0, v_0) .

Esercizio: un corpo di massa $m=2$ kg cade, partendo da fermo, da un'altezza $y_0 = 10$ m. Quali sono la sua energia cinetica e la sua velocità quando tocca terra ($y = 0$)?

$$T_0 = 0$$

$$U_0 = mgy_0 = (2 \text{ kg}) \cdot (10 \text{ m/s}^2) \cdot (10 \text{ m}) = 200 \text{ J}$$

$$U = 0$$

$$T = T_0 + U_0 - U = 200 \text{ J}$$

$$(1/2)mv^2 = 200 \text{ J} \quad v = \sqrt{400 \text{ J}/(2 \text{ kg})} = 14.14 \text{ m/s}$$

CdL Professioni Sanitarie
A.A. 2012/2013

Forze non-conservative e lavoro: teorema lavoro-energia

Il moto di un corpo soggetto ad una *forza conservativa* è caratterizzato dal fatto che esiste una quantità, detta *energia meccanica*, che si conserva. Se U è l'energia potenziale del corpo, $T = mv^2/2$ la sua energia cinetica e $E = T + U$ la sua energia meccanica, possiamo scrivere:

$$T + U = T_0 + U_0 \quad \Delta T + \Delta U = 0 \quad E = E_0 \quad \Delta E = 0$$

Nel caso più generale in cui agisca anche una *forza non-conservativa* F , l'energia meccanica totale non si conserva. L'espressione precedente non è più valida, ma si può generalizzare nel modo seguente:

$$\Delta T + \Delta U = W \quad \Delta E = W$$

dove la quantità W rappresenta l'energia meccanica persa o guadagnata dal corpo durante il moto. Essa viene detta **lavoro fatto dalla**

forza F e dipende dallo spostamento del corpo Δs e dall'angolo θ tra la direzione dello spostamento e quella della forza (figura 2.17, Monaco-Sacchi-Solano):

$$W = F \Delta s \cos \theta$$

Il lavoro è una grandezza derivata e nel Sistema Internazionale si misura in: $[W] = [F] \cdot [l] = \text{N} \cdot \text{m} = \text{Joule}$

Il lavoro è massimo se forze e spostamento sono nella stessa direzione ($\theta = 0$), è nullo se forza e spostamento sono perpendicolari ($\theta = 90^\circ$) ed infine è negativo se $\theta > 90^\circ$.

Pur essendo stato introdotto per descrivere l'effetto di una forza non-conservativa, la definizione di lavoro ha validità generale e può essere utilizzata per una generica forza F (anche conservativa). Per una forza conservativa, il lavoro fatto nello spostamento di un corpo tra due punti A e B è sempre uguale alla differenza di energia potenziale tra gli stessi due punti, indipendentemente dal cammino percorso dal corpo.

Esercizio: un massa $m = 3$ kg scivola lungo un piano inclinato di 30° con la direzione orizzontale per una distanza $\Delta s = 5$ m. Qual è

il lavoro fatto dalle diverse forze che agiscono sul corpo? Si trascuri l'attrito.

$$\begin{aligned} W_a &= 0 && \text{lavoro forza di attrito } (F_a = 0) \\ W_c &= F_c \Delta s \cos 90^\circ = 0 && \text{lavoro forza di contatto} \\ W_g &= F_g \Delta s \cos 60^\circ && \text{lavoro forza di gravità} \end{aligned}$$

$$F_g = mg = (3 \text{ kg}) \cdot (10 \text{ m/s}^2) = 30 \text{ N}$$

$$W_g = F_g \Delta s \cos 60^\circ = (30 \text{ N}) \cdot (5 \text{ m}) \cdot 0.5 = 75 \text{ J}$$

Nel caso in cui non ci sia variazione di energia potenziale ($\Delta U = 0$) oppure se l'azione delle forze conservative viene espressa attraverso il lavoro W , si può scrivere:

$$\Delta T = W$$

Questa espressione viene detta **teorema lavoro-energia**. Essa esprime il fatto che il lavoro totale delle forze agenti su di un corpo è uguale alla variazione della sua energia cinetica. Conoscendo il lavoro W si può calcolare la velocità finale del corpo:

$$\Delta T = W \rightarrow \frac{1}{2}mv^2 = W \rightarrow v = \sqrt{2W/m}$$

Esercizio: un treno traina orizzontalmente un convoglio per 100 m con una forza di 4×10^7 N. Che lavoro ha compiuto? Trascurando l'attrito e sapendo che la massa del treno è pari a 20000 tonnellate, quale velocità raggiunge?

$$\Delta s = 10^2 \text{ m}, F = 4 \times 10^7 \text{ N}, \theta = 0$$

$$m = 2 \times 10^4 \text{ ton} = 2 \times 10^7 \text{ kg}$$

$$W = F \Delta s \cos \theta = (10^2 \text{ m})(4 \times 10^7 \text{ N}) = 4 \times 10^9 \text{ J}$$

$$v = \sqrt{2W/m} = \sqrt{2(4 \times 10^9 \text{ J}) / (2 \times 10^7 \text{ kg})} = \sqrt{4 \times 10^2} \text{ m/s} = 20 \text{ m/s}$$

Per misurare quanto lavoro viene fatto in un certo tempo Δt da una forza si definisce la **potenza P**:

$$P = W/\Delta t$$

con unità di misura: $[P] = [W/\Delta t] = [W]/[t] = J/s = Watt (W)$.

CdL Professioni Sanitarie
A.A. 2012/2013

Trasformazione dell'energia meccanica in calore
I Principio della Termodinamica

Consideriamo un insieme (sistema) di più corpi (particelle) e definiamo la sua **energia interna** E_s nel modo seguente:

$$E_s = \sum_i (U_i + T_i)$$

Essa rappresenta la somma dell'energia potenziale e cinetica di tutte le particelle del sistema. Per quanto precedentemente detto, la conservazione dell'energia interna del sistema si può quindi scrivere:

$$\Delta E_s = \sum_i (\Delta U_i + \Delta T_i) = W'$$

dove W' rappresenta il lavoro totale delle forze che agiscono sulle particelle del sistema e che non sono descritte dai potenziali U_i .

Esistono tuttavia dei fenomeni in cui l'energia persa o acquisita da un sistema di particelle non è riconducibile ad un lavoro meccanico

ma sono accompagnati da trasferimento di calore (**processi termici**). Un oggetto caldo, messo a contatto con uno più freddo, gradualmente trasferisce calore a quest'ultimo. Se Q è **la quantità di calore fornita al sistema** in un processo termico, possiamo scrivere la forma più generale possibile di conservazione dell'energia per il sistema nel modo seguente:

$$\Delta E_s = Q + W'$$

Normalmente, al posto del lavoro W' fatto sul sistema, si utilizza il **lavoro W fatto dal sistema**. Si ha: $W' = -W$. L'espressione precedente diviene così il **I Principio della Termodinamica**:

$$\Delta E_s = Q - W$$

La variazione dell'energia interna di un sistema è uguale al calore assorbito dall'esterno meno il lavoro fatto dal sistema. *Il calore è esso stesso una forma di energia: esso è infatti energia interna (termica) nell'atto di trasferirsi da un corpo più caldo ad uno più freddo. Il trasferimento di calore avviene sempre spontaneamente dal corpo più caldo a quello più freddo.*

Prima di comprendere che il calore è una forma di energia, esso fu definito come una grandezza fisica indipendente con una sua unità di misura, denominata **kilocaloria (kcal)**. Essa verrà definita in seguito.

Il I Principio della Termodinamica rappresenta la forma più generale di conservazione dell'energia per un sistema di particelle che include i processi termici. Sistemi di questo tipo vengono detti **termodinamici**. *L'energia totale, includendo tutte le sue possibili forme, può essere scambiata e trasformata da una forma all'altra, ma rimane sempre costante.*

Se il sistema non ha scambi di energia con l'esterno viene detto **isolato**. In tal caso: $Q = 0$, $W = 0$ e quindi $\Delta E_s = 0$. L'energia interna del sistema rimane invariata.

Tipicamente l'approccio descritto in queste pagine si utilizza quando si studiano sistemi macroscopici costituiti da un grandissimo numero di particelle microscopiche. Non interessa e non è possibile studiare il moto delle singole particelle costituenti. Per descriverne il comportamento complessivo, si utilizzano delle grandezze fisiche macroscopiche che sono in relazione statisticamente alla posizione e velocità delle singole particelle.

CdL Professioni Sanitarie
A.A. 2012/2013

Temperatura e sua misura

La temperatura di un corpo indica quanto esso è caldo o freddo, ossia il suo livello termico. Nel Sistema Internazionale la temperatura è una **grandezza fisica fondamentale**. Per essa si possono definire un procedimento di misura ed una unità di misura. Lo strumento di misura è il **termometro**, il cui funzionamento si basa sulla variazione di una proprietà fisica di una sostanza (ad esempio il volume o la pressione) che risulta correlata con la variazione di temperatura.

Nel termometro tradizionale un bulbo di vetro viene riempito con un materiale liquido (usualmente mercurio) che si dilata o si restringe quando è posto a contatto con un corpo rispettivamente più caldo o più freddo. La colonna di mercurio quindi sale o scende, sino a che il termometro raggiunge l'*equilibrio termico* con il corpo, ossia la medesima temperatura. A questo punto non si nota più alcuna variazione

dell'altezza della colonna di mercurio. Infatti, due corpi inizialmente a temperatura diversa, se posti a contatto, dopo un certo tempo raggiungono la stessa temperatura (*principio dell'equilibrio termico*).

La variazione del volume V di una sostanza con la temperatura viene espressa dalla relazione:

$$V = V_0[(1 + \alpha(T - T_0))]$$

dove V_0 è il volume della sostanza a temperatura T_0 e α un coefficiente di proporzionalità detto *coefficiente di dilatazione termica*.

L'unità di misura, il **grado centigrado o grado Celsius ($^{\circ}\text{C}$)**, viene definita operativamente attraverso la differenza tra le altezze (o i volumi) della colonna di mercurio quando il termometro è a contatto con l'acqua fondente, cui viene attribuito il valore di 0°C , e con l'acqua in ebollizione, cui viene attribuito il valore di 100°C . Usualmente si prende $T_0 = 0^{\circ}\text{C}$.

Il termometro più accurato e preciso utilizzato in Fisica si basa però sull'utilizzo di variazioni di pressione di un gas rarefatto (a densità molto bassa) al variare della temperatura. Se p_f e T_f rappresentano la pressione e la temperatura quando il termometro è a contatto con

l'acqua fondente, la pressione ad una generica temperatura T si esprime con la relazione:

$$p = p_f(T/T_f)$$

Assumendo ancora che la differenza tra la temperatura del termometro quando è a contatto con l'acqua fondente e con l'acqua in ebollizione sia 100 e misurando le pressioni a queste temperature, si ottiene $T_f = 273,15$. L'unità di misura così definita viene detta grado **Kelvin (K)** ed è quella adottata nel Sistema Internazionale. Si tratta sempre di una scala centigrada ma risulta traslata rispetto a quella Celsius. La relazione tra le due unità di misura è infatti:

$$T(^{\circ}C) = T(K) - 273.15$$

La temperatura, misurata in Kelvin, viene detta assoluta. Utilizzando questa scala si nota che la temperatura minima possibile è pari a 0 K. Essa corrisponde alla condizione di pressione nulla. Quindi, nella scala Celsius, la temperatura minima possibile è pari a $-273.15^{\circ}C$.

Dal punto di vista microscopico, la temperatura viene messa in relazione con il *livello di agitazione termica* delle sue molecole, ossia con il loro moto caotico. Essa quindi misura l'energia cinetica dell'insieme delle molecole di una sostanza.

CdL Professioni Sanitarie
A.A. 2012/2013

Calore specifico ed equivalente meccanico del calore

Il calore assorbito o ceduto da un corpo si misura proprio attraverso differenze di temperatura. Infatti il calore trasferito fa diminuire o aumentare l'energia termica di un corpo e quindi fa variare il suo livello termico, misurato dalla temperatura. Se un corpo si trova inizialmente alla temperatura T_i e, dopo essere stato a contatto con un altro corpo (o sostanza), ha una temperatura finale T_f , la quantità di calore ceduta (o assorbita) è data da:

$$Q = C_{p,V}(T_f - T_i) = C_{p,V}\Delta T$$

dove la grandezza $C_{p,V}$ dipende dal corpo considerato e viene detta **capacità termica**. A seconda che il trasferimento di calore avvenga a pressione o volume costante, essa viene detta capacità termica a pressione (C_p) o volume (C_V) costante. Se m è la massa del corpo, si

può definire anche il suo **calore specifico** $c_{p,V}$ (anch'esso a pressione o volume costante) come:

$$c_{p,V} = C_{p,V}/m$$

Quindi, possiamo scrivere anche:

$$Q = mc_{p,V}(T_f - T_i) = mc_{p,V}\Delta T$$

La kcal, l'unità di misura del calore, è definita a partire da questa espressione. *Una kcal è la quantità di calore necessaria per innalzare di 1°C la temperatura di 1 kg di acqua a pressione costante, ossia:*

$$1\text{kcal} = c_{p,\text{acqua}}(1\text{kg})(1^{\circ}\text{C})$$

da cui discende che il calore specifico dell'acqua è: $c_{p,\text{acqua}} = 1 \text{ kcal/kg/}^{\circ}\text{C}$.

Una volta compresa la stretta parentela tra calore ed energia, attraverso un famoso esperimento (**esperimento di Joule**) si potè determinare anche la relazione di trasformazione tra kcal e Joule, detta **equivalente meccanico del calore**: $1 \text{ kcal} = 4186 \text{ J}$.

Esercizio: calcolare il calore necessario (in kcal e Joule) per innalzare la temperatura dell'acqua di uno scaldabagno da 20°C a 60°C ($\Delta T = 40^{\circ}\text{C}$). Si assuma che la capacità termica (a pressione costante) dell'acqua nello scaldabagno sia $C_p = 100 \text{ kcal}/^{\circ}\text{C}$.

$$Q = C_p \Delta T = (100 \text{ kcal}/^{\circ}\text{C}) \cdot (40^{\circ}\text{C}) = 4 \times 10^3 \text{ kcal}$$

$$x : (4 \times 10^3 \text{ kcal}) = (4186 \text{ J}) : (1 \text{ kcal}) \rightarrow x = 1.674 \times 10^6 \text{ J}$$

Esercizio: per scaldare la stanza di un ospedale viene utilizzata una quantità di calore $Q = 250 \text{ kcal}$. Se la capacità termica dell'aria contenuta nella stanza è $C_p = 25 \text{ kcal}/^{\circ}\text{C}$, qual è l'aumento di temperatura ΔT dell'aria?

$$\Delta T = Q/C_p = (250 \text{ kcal})/(25 \text{ kcal}/^{\circ}\text{C}) = 10^{\circ}\text{C}$$

Esercizio: per aumentare la temperatura di $m = 4.5 \text{ kg}$ di ferro da 20 a 40°C ($\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$) occorrono $Q = 9 \text{ kcal}$. Qual è il calore specifico c_p del ferro?

$$c_p = Q/(m\Delta T) = (9 \text{ kcal})/[(4.5 \text{ kg}) \cdot (20^{\circ}\text{C})] = (9 \text{ kcal})/(90 \text{ kg}^{\circ}\text{C}) = 0.1 \text{ kcal}/\text{kg}/^{\circ}\text{C}$$

Temperatura di equilibrio

Consideriamo due corpi a temperature diverse $T_1 > T_2$ che vengono messi a contatto. In base al Principio dell'equilibrio termico essi raggiungono la stessa temperatura finale T_f . Qual è il suo valore?

$$Q_1 = m_1 c_1 (T_f - T_1)$$

$$Q_2 = m_2 c_2 (T_f - T_2)$$

$$-Q_1 = Q_2$$

$$T_f = \frac{c_1 m_1 T_1 + c_2 m_2 T_2}{c_1 m_1 + c_2 m_2}$$

Esercizio: Si vuole raffreddare un pezzo di ferro di 1 kg alla temperatura di 500°C immergendolo in 10 kg di acqua alla temperatura di 15°C . Qual è la temperatura finale?

$$c_1 = 0.11 \text{ kcal/kg/}^\circ\text{C}, m_1 = 1 \text{ kg}, T_1 = 500^\circ\text{C}$$

$$c_2 = 1 \text{ kcal/kg/}^\circ\text{C}, m_2 = 10 \text{ kg}, T_2 = 15^\circ\text{C}$$

$$T_f = (c_1 m_1 T_1 + c_2 m_2 T_2) / (c_1 m_1 + c_2 m_2) = 20.3^\circ\text{C}$$

Calore latente

Una sostanza può passare da uno stato di aggregazione all'altro (**cam-biamento di stato**). I possibili cambiamenti sono (figura 4.2, Monaco-Sacchi-Solano):

- **fusione/solidificazione**: da liquido a solido e viceversa
- **evaporazione/condensazione**: da liquido a gas e viceversa
- **sublimazione/brinamento**: da solido a gas e viceversa

Quando coinvolgono tutta la massa della sostanza, queste transizioni avvengono ad una temperatura caratteristica (ad es. la fusione dell'acqua alla pressione atmosferica avviene alla temperatura di $0^{\circ}C$).

Durante questi cambiamenti il calore assorbito o ceduto dalla sostanza non viene utilizzato per cambiarne la temperatura bensì per variare lo stato di coesione delle molecole (la loro energia potenziale). La quantità di calore scambiata durante una transizione di stato è proporzionale alla massa m della sostanza:

$$Q = k \cdot m$$

La costante k viene detta **calore latente** del cambiamento di stato considerato e dipende dalla sostanza. Durante la transizione inversa il calore scambiato è uguale in valore assoluto ma di segno opposto. Il *calore latente di fusione* dell'acqua è $k_f = 80 \text{ kcal/kg}$, mentre quello di *solidificazione* è $k_s = -k_f$.

Se non coinvolge tutta la sostanza ma solo parte di essa, tipicamente la superficie, il cambiamento di stato può avvenire a temperatura inferiore. L'energia fornita/sottratta alle molecole della superficie è sufficiente per farle cambiare di stato, mentre il resto del corpo si trova ad una temperatura troppo bassa perché possa avvenire la transizione. Alla temperatura di 37°C , il *calore latente di evaporazione* dell'acqua è $k_e = 580 \text{ kcal/kg}$.

Esercizio: una barra di rame di 40 kg fonde fornendole una quantità di calore pari a 2000 kcal. Qual è il calore latente di fusione del rame?

$$Q = k \cdot m \rightarrow k_{f,rame} = Q/m = (2000 \text{ kcal})/(40 \text{ kg}) = 50 \text{ kcal/kg}$$

CdL Professioni Sanitarie
A.A. 2012/2013

[*Gli argomenti che seguono non fanno parte del programma dei Corsi di Laurea in Fisioterapia e Tecniche di Radiologia*]

Macchine termiche

In base al I Principio della Termodinamica, in un sistema sono possibili diversi scambi di energia. Ad esempio, il lavoro W fatto da un sistema può sempre essere integralmente convertito in calore Q assorbito dal sistema. Tuttavia, alcuni particolari scambi di energia, benché ammessi dal I Principio, non avvengono in natura. Ad esempio, *non è possibile convertire integralmente in lavoro W una quantità di calore Q_1 assorbita da un sistema. In questo processo una certa quantità di calore Q_2 viene ceduta all'ambiente (che si deve quindi trovare ad una temperatura inferiore)*. Il lavoro effettuato è (figura 4.4B, Monaco-Sacchi-Solano):

$$W = Q_1 - Q_2 .$$

Un qualsiasi sistema in grado di produrre lavoro in questo modo viene detto **macchina termica**. Il rapporto $\epsilon = W/Q_1$ viene detto *efficienza* della macchina termica.

Applicazione: metabolismo

Dal punto di vista fisico, il corpo è assimilabile in parte ad una macchina termica, in quanto produce lavoro cedendo contemporaneamente calore all'esterno. Però l'energia necessaria per compiere lavoro non viene assorbita dall'esterno, ma viene prodotta all'interno a spese dell'energia potenziale delle molecole di ATP (adenosintrifosfato). Questa energia deve poi venire reintegrata con l'assunzione di alimenti che vengono scomposti in macromolecole e 'bruciati' per produrre energia (poi immagazzinata nell'ATP).

L'insieme delle reazioni biochimiche che rilasciano energia nel corpo sotto forma di calore e gli consentono di fare lavoro viene detta **metabolismo**.

Nel metabolismo, l'energia potenziale interna rilasciata (U_{pot}) viene trasformata (figura 4.5, Monaco-Sacchi-Solano):

- direttamente in calore (Q_{prod})

- in lavoro (L); come detto sopra, questo non può avvenire senza che una parte dell'energia venga ceduta al corpo sempre sotto forma di calore.

Tutta l'energia rilasciata per unità di tempo nel metabolismo viene detta **potenza metabolica**:

$$MR = -\Delta U_{pot} / \Delta t.$$

Essa è un parametro diagnostico importante e viene misurata a partire dalla quantità di ossigeno consumata dai processi metabolici con un particolare spirometro.

Il calore prodotto durante il metabolismo, Q_{prod} , va ad aumentare l'energia cinetica interna del corpo, ossia la sua temperatura. Per mantenerla costante, il corpo cede una pari quantità di calore (Q_{diss}) all'esterno: $Q_{diss} = Q_{prod}$. Questo processo viene detto *termoregolazione*.

La **potenza metabolica basale (basal metabolic rate, BMR)** è la *potenza minima necessaria per mantenere i processi vitali (funzione respiratoria, cardiaca, temperatura), in condizioni di riposo fisico e mentale*. Dato che *in queste condizioni* non viene fatto lavoro all'esterno, ma solo all'interno del corpo (come ad esempio nel cuore), e che

tale lavoro alla fine viene interamente dissipato in calore a causa degli attriti, la potenza metabolica basale coincide con il calore prodotto per unità di tempo e quindi con la potenza dissipata verso l'esterno: $BMR = Q_{diss}/\Delta t$. Per un individuo adulto di 70 kg:

- $BMR = 75 \text{ W}$

- Fabbisogno giornaliero minimo:

$$-\Delta U_{pot}^{BMR} = BMR \cdot \Delta t = (75 \text{ W})(86400 \text{ s}) = 6.48 \times 10^6 \text{ J} = 1550 \text{ kcal}$$

In condizioni di attività fisica, la potenza metabolica totale è la somma della BMR e della potenza necessaria a produrre il lavoro richiesto MR_L :

$$MR = BMR + MR_L.$$

L'energia interna non può essere interamente convertita in lavoro. Quindi, se con $P = L/\Delta t$ indichiamo la potenza meccanica che corrisponde al lavoro prodotto L e con ϵ la percentuale di energia interna convertita in lavoro ($\epsilon = L/(-\Delta U_{pot})$), si ha:

$$MR_L = -\Delta U_{pot}^L / \Delta t = L / \Delta t / \epsilon = P / \epsilon$$
$$MR = BMR + P / \epsilon.$$

L'energia che non produce lavoro viene dissipata in calore. Durante un'attività fisica intensa MR può raggiungere i 1000 W.

Esercizio: calcolare l'aumento della potenza metabolica di un ciclista con una massa di 65 kg che percorre una tappa di montagna superando un dislivello di 500 m in 30 minuti. Si assuma che l'efficienza muscolare sia pari al 30%.

$$m = 65 \text{ kg}, \Delta y = 500 \text{ m} = 5 \times 10^2 \text{ m}, \Delta t = 30 \text{ minuti} = 1.8 \times 10^3 \text{ s}$$

$$L = mg\Delta y = (65 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2)(5 \times 10^2 \text{ m}) = 3.25 \times 10^5 \text{ J}$$

$$P = L/\Delta t = (3.25 \times 10^5 \text{ J})/(1.8 \times 10^3 \text{ s}) = 1.8 \times 10^2 \text{ W}$$

$$MR_L = P/\epsilon = (1.8 \times 10^2 \text{ W})/(0.3) = 6 \times 10^2 \text{ W}$$

$$MR = BMR + MR_L = 675 \text{ W}$$

CdL Professioni Sanitarie
A.A. 2012/2013

Trasmissione del calore

Il calore viene trasmesso (da un corpo a temperatura maggiore a uno a temperatura minore) in 3 modi diversi.

- **Conduzione**

Avviene quando due sistemi a temperature diverse sono messi a contatto attraverso una superficie solida. *Si trasferisce calore ma non materia.* Le molecole della sostanza più calda trasferiscono energia cinetica a quella più fredda tramite gli urti delle molecole con quelle del solido interposto. In questo modo l'agitazione termica della sostanza più fredda aumenta (e quella della sostanza più calda diminuisce).

Il calore trasferito per unità di tempo nella conduzione è direttamente proporzionale alla differenza di temperatura dei due sistemi,

all'area della superficie solida di separazione, ad una costante caratteristica che dipende dal materiale della superficie (*coefficiente di conducibilità termica*). È invece inversamente proporzionale allo spessore della superficie. Più piccola è la conducibilità e minore è il calore trasferito. Materiali con valori molto piccoli della conducibilità vengono detti **isolanti termici**.

- **Convezione**

Si verifica in un fluido in moto. È il fluido stesso a trasportare le molecole e la loro energia termica da una zona all'altra. *Si trasferisce quindi calore insieme con la materia*. Anche nella convezione il calore trasferito per unità di tempo tra due diverse zone del fluido è direttamente proporzionale alla loro differenza di temperatura.

- **Irraggiamento**

Avviene a causa dell'emissione/assorbimento di energia sotto forma di onde elettromagnetiche (quali la luce o la radiazione infrarossa) da parte di qualunque sostanza. Tale emissione/assorbimento fa diminuire/aumentare l'energia interna della sostanza. L'energia trasferita *dipende dalla differenza tra la quarta potenza della*

temperatura (T^4) della sostanza e quella dell'ambiente in cui essa si trova. Se il corpo si trova nel vuoto, l'irraggiamento può comunque avvenire dato che la radiazione elettromagnetica si può propagare nel vuoto.

La temperatura del corpo umano (37°C) è tale che l'emissione avviene nei raggi infrarossi. Una particolare tecnica (termografia) consente di determinare la temperatura superficiale delle varie parti del corpo in base al preciso valore della lunghezza d'onda della radiazione infrarossa emessa.

Termoregolazione

Come abbiamo visto, per mantenere la temperatura corporea costante, il corpo deve cedere all'esterno una quantità di calore pari a quello prodotto internamente nel metabolismo, ossia:

$$Q_{diss} = Q_{prod} \quad Q_{diss}/\Delta t = Q_{prod}/\Delta t$$

La termoregolazione corporea consiste in tutti i meccanismi utilizzati dal corpo umano (e regolati dall'ipotalamo) per rispettare questa condizione.

Oltre a variare Q_{prod} attraverso i processi metabolici, il corpo può anche variare Q_{diss} attraverso la sudorazione ed i meccanismi di trasmissione del calore descritti in precedenza.

- **Trasferimento dall'interno del corpo alla pelle:** avviene per conduzione tra i diversi organi, tessuti e fluidi a contatto, e per convezione grazie al moto del sangue.
- **Trasferimento dalla pelle all'esterno:** avviene per irraggiamento, per conduzione con i vestiti e l'aria (ferma) a contatto con la pelle, e per convezione con l'aria circostante in movimento.

Un altro meccanismo utilizzato per dissipare calore è la **sudorazione**. Esso è l'unico efficace se la temperatura dell'ambiente circostante è maggiore di quella del corpo. L'evaporazione di una massa m di acqua richiede una quantità di calore $Q_{diss} = k_e m$, che viene sottratta al corpo raffreddandolo. Alla temperatura corporea il calore latente di evaporazione è $k_e = 580$ kcal/kg.

I meccanismi che mette in atto il corpo umano per variare l'efficacia dei diversi meccanismi sono:

- **Diminuzione del trasferimento di calore in ambiente freddo**
Vasocostrizione: diminuisce l'afflusso di sangue sotto la pelle e quindi anche il calore trasferito per convezione.
Brividi: aumentano il lavoro muscolare interno con produzione di calore.

In aggiunta, *il corpo tende ad aumentare anche l'attività e la potenza metabolica*, il che comporta l'assunzione di cibi di elevato contenuto energetico.

- **Aumento del trasferimento di calore in ambiente caldo**
Vasodilatazione: aumenta l'afflusso di sangue sotto la pelle e quindi anche il calore trasferito per convezione.
Sudorazione: avviene quando gli altri meccanismi non sono efficaci oppure è necessario smaltire il calore interno rapidamente a seguito di un intenso esercizio fisico.

Allo stesso tempo, *il corpo tende a limitare l'attività e la potenza metabolica*, il che comporta l'assunzione di cibi a basso contenuto calorico ed una minore attività fisica.

Esercizio: calcolare la quantità di calore e la potenza dissipata da un atleta che durante un esercizio ha perso 0.3 kg di sudore in 10 minuti.

$$m = 0.3 \text{ kg}, \Delta t = 10 \text{ minuti} = 6 \times 10^2 \text{ s}$$

$$Q_{diss} = k_e m = (5.8 \times 10^2 \text{ kcal/kg})(3 \times 10^{-1} \text{ kg}) = 1.7 \times 10^2 \text{ kcal}$$

$$Q_{diss} = 7.1 \times 10^5 \text{ J}$$

$$Q_{diss}/\Delta t = (7.1 \times 10^5 \text{ J})/(6 \times 10^2 \text{ s}) = 1.2 \times 10^3 \text{ W}$$

CdL Professioni Sanitarie
A.A. 2012/2013

Esercizi riassuntivi

(1) Un'auto ha una massa di 2400 kg e sta viaggiando ad una velocità di 10 m/s. Qual è la sua energia cinetica?

$$m = 2.4 \times 10^3 \text{ kg}, v = 10 \text{ m/s}$$

$$T = (1/2)mv^2 = 0.5(2.4 \times 10^3 \text{ kg})(10 \text{ m/s})^2 = 2.4 \times 10^5 \text{ J}$$

(2) Un uomo tira uno slittino con una corda. Lo slittino si muove orizzontalmente senza attrito per una distanza di 28 m, mentre la corda forma un angolo di 60 gradi con la direzione del moto dello slittino. Se la forza esercitata dall'uomo attraverso la corda è $F_m = 100 \text{ N}$ e la slitta ha una massa $m = 15 \text{ kg}$, qual è il lavoro W fatto da ciascuna delle forze agenti?

$$F_a = 0$$

$$F_g = mg = (15 \text{ kg})(10 \text{ m/s}^2) = 1.5 \times 10^2 \text{ N}, \Delta s = 28 \text{ m}, \theta_g = 90^\circ$$

$$F_m = 10^2 N, \Delta s = 28 m, \theta_m = 60^\circ$$

$$W_a = 0$$

$$W_g = F_g \Delta s \cos \theta_g = 0$$

$$W = F_m \Delta s \cos \theta_m = (10^2 N)(28 m)0.5 = 1.4 \times 10^3 J$$

(3) La dietista di un ospedale prevede che la cena dei pazienti ricoverati dia un apporto calorico $Q = 500$ calorie. A quanti Joule equivale (si ricordi che $1 \text{ kcal} \simeq 4000 \text{ J}$)?

$$x : (5 \times 10^2 \text{ cal}) = (4 \times 10^3 \text{ J}) : (10^3 \text{ cal})$$

$$x = 2 \times 10^3 J$$

(4) Un sistema assorbe dall'ambiente una quantità di calore $Q = 2000$ J, mentre compie un lavoro $W = 3000$ J. Qual è la variazione di energia interna del sistema?

$$Q = 2000 J, W = 3000 J$$

$$\Delta E_s = Q - W = 2000 J - 3000 J = -1000 J$$

(5) Per sciogliere completamente un blocco di ghiaccio (alla temperatura di 0° C) viene fornita una quantità di calore pari a 16 kcal . Calcolare la massa del blocco. IL calore latente di fusione dell'acqua è $k_f = 80 \text{ kcal/kg}$.

$$Q = 18 \text{ kcal}, k_f = 80 \text{ kcal/kg}$$

$$Q = k_f \cdot m \rightarrow m = Q/k_f = (16 \text{ kcal})/(80 \text{ kcal/kg}) = 2 \times 10^{-1} \text{ kg} = 0.2 \text{ kg}$$

(6) In una giornata calda, il corpo ha bisogno di aumentare di 5 volte il calore trasportato per conduzione nell'unità di tempo dall'interno verso la pelle. Ciò si ottiene riducendo lo spessore effettivo l dei tessuti portando il flusso di sangue più vicino alla pelle (attraverso la vasodilatazione). Di quanto deve essere ridotto lo spessore per aumentare di 5 volte il calore trasportato nell'unità di tempo?

[Esercizio relativo ad un argomento che non fa parte del programma dei Corsi di Laurea in Fisioterapia e Tecniche di Radiologia]

$$Q/\Delta t \propto 1/l$$

$$Q'/\Delta t = 5Q/\Delta t \rightarrow Q' = 5Q$$

$$Q'/Q = l/l' \rightarrow l' = (Q/Q')l = l/5$$