

# Il I Principio della Termodinamica

Dott.ssa M. Gabriella Ortu

Liceo Scientifico "Alberti" di Cagliari - IV C (P.N.I. mat. e fis.).

Lezione per il tirocinio operativo del biennio S.S.I.S 2005-2007  
classe di concorso A049

Lezione n.8 del 6 Dicembre 2006



## Note di copyright

*Copyright (c) 2006 Maria Gabriella Ortu.*

*Permission is granted to copy, distribute and/or modify this document under the terms of the GNU Free Documentation License, Version 1.1 or any later version published by the Free Software Foundation; with no Invariant Sections, with no Front-Cover Texts, and with no Back-Cover Texts. A copy of the license is included in the section entitled "GNU Free Documentation License".*

*Copyright (c) 2006 Maria Gabriella Ortu*

*È garantito il permesso di copiare, distribuire e/o modificare questo documento seguendo i termini della Licenza per Documentazione Libera GNU, Versione 1.1 o ogni versione successiva pubblicata dalla Free Software Foundation; senza Sezioni Non Modificabili, nessun Testo Copertina e nessun Testo di Retro Copertina. Una copia della licenza è acclusa nella sezione intitolata "Licenza per Documentazione Libera GNU"*



# Realizzazione

Questa presentazione è stata realizzata con la classe 'Beamer' di  $\text{\LaTeX}$ . Informazioni e download alla pagina:

<http://www.ctan.org/tex-archive/help/Catalogue/entries/beamer.html>

oppure alla pagina:

<http://latex-beamer.sourceforge.net/>



## Parte I

### Definizione operativa di energia interna



# Perché definire un'energia interna?

- ▶ quando nell'interazione fra corpi vi sono variazioni di temperatura la conservazione dell'energia sembra violata;
- ▶ e se in questi fenomeni **l'energia meccanica (macroscopica) non è persa ma si è trasformata in energia meccanica microscopica?** in energia cinetica e potenziale delle molecole?
- ▶ **plausibilità**: *i corpi hanno struttura interna costituita di atomi e molecole in continuo movimento ('agitazione termica')*;
- ▶ nasce l'intuizione di una forma di energia che un corpo possiede indipendentemente dal suo stato di moto e dalla sua posizione;
- ▶ **la plausibilità non basta**: **ogni concetto fisico deve essere definito da un procedimento di misura, per parlare di energia interna dobbiamo sapere come misurarla**;
- ▶ non banale: il concetto origina da considerazioni su struttura microscopica corpo, **ma ogni def. operativa deve basarsi su proprietà macroscopiche**, su grandezze misurabili (lo stato microscopico di  $10^{23}$  molecole non è determinabile ma lo stato macroscopico di equilibrio sì (P,V,T))



# Come definire un'energia interna?

L'energia interna è un concetto che si ha necessità di introdurre quando si è in presenza di fenomeni termici.

**Domanda:** **Cosa occorre per definire un'energia interna?**

1. legare l'energia interna  $U$  a parametri macroscopici (es. P,V,T) che possiamo misurare: l'energia interna di un corpo ha un valore ben definito quando è definito lo stato termodinamico del corpo;
2. trovare un modo per comunicare al sistema, al corpo, energia interna agendo dall'esterno, tramite procedimenti macroscopici: in pratica, facendo lavoro sul sistema (es. lavoro meccanico ottenuto facendo scendere un peso, si veda più avanti...);
3. definire operativamente come misurare l'energia interna, legando quantitativamente il **lavoro dissipato** (= *lavoro esterno fatto sul corpo meno lavoro fatto dal corpo sull'esterno*) all'aumento dell'energia dei costituenti microscopici del corpo.



# Discussione dei tre punti indicati

## 1. LEGAME U CON P,V,T

questa possibilità si fonda sull'interpretazione microscopica dei parametri termodinamici

## 2. COMUNICARE ENERGIA INTERNA DALL'ESTERNO

per legare quantitativamente il lavoro dissipato all'aumento dell'energia interna occorre:

- ▶ che l'aumento di energia interna ottenuto dissipando energia esterna non sfugga dal corpo verso l'esterno (interpretazione termodinamica di **isolamento termico perfetto**);
- ▶ che il lavoro dissipato vada **tutto** in aumento di energia microscopica (e non serva, ad es., per variare l'energia meccanica macroscopica del corpo);



# Discussione dei tre punti indicati

dire che **l'energia dissipata sul corpo vada tutta in aumento dell'energia interna significa supporre valida la conservazione dell'energia**: tanta energia perde l'ambiente quanta ne guadagna il sistema termodinamico;

## 3. DEFINIRE OPERATIVAMENTE U

se i due punti di cui sopra sono ipotesi verificate, allora ha senso definire la **variazione dell'energia interna di un corpo quando questo passa da uno stato termodinamico iniziale A ad uno stato termodinamico finale B come il lavoro scambiato fra corpo e ambiente durante la trasformazione di stato.**



# Riassumendo

- ▶ **scopo**: voglio definire operativamente l'energia interna o, meglio, la variazione di energia interna  $\Delta U$ ;
- ▶ **cosa voglio che sia l'energia interna di un corpo?**: una grandezza, avente le dimensioni di un'energia, che io introduco in presenza di fenomeni termici, che voglio che dipenda unicamente dai parametri termodinamici (P,V,T);
- ▶ **come posso misurarla?**: devo mettermi nelle condizioni per cui i parametri termodinamici del corpo (e quindi la sua energia interna!) varino solo a causa di lavoro scambiato con l'esterno; allora, se dissipando tutta l'energia esterna non si ha altro effetto che la variazione dei parametri termodinamici del corpo, posso dire che  $U(B) - U(A) = L_{diss} = -\Delta E_{tot}^{amb}$  (es. solo meccanica, magari facendo scendere un peso...vedi avanti); **poter porre questa definizione significa ammettere la validità della conservazione dell'energia.**



## Come si fa a far variare i parametri termodinamici?

Un corpo può essere portato da uno stato termodinamico di equilibrio  $A(P_A, V_A, T_A)$  ad uno stato  $B(P_B, V_B, T_B)$  in due modi:

- ▶ **isolando termicamente** il corpo tramite pareti adiabatiche e facendo in modo che il corpo possa fare lavoro sull'esterno, oppure dall'esterno possa essere fatto lavoro sul corpo (solo scambio di lavoro);
- ▶ ponendo il corpo in **contatto termico** con un altro corpo a temperatura diversa, senza possibilità di eseguire o subire lavoro (solo scambio di calore);

in entrambi i casi si ha variazione dei parametri termodinamici e quindi dell'energia interna del corpo;

- ▶ ovviamente si possono effettuare trasformazioni anche **combinando** le due cose: contatto termico con possibilità di scambio sia di calore che di lavoro.



# Definizione operativa di energia interna

- ▶ quando il corpo può variare la propria energia solo attraverso **fenomeni termici** (in particolare, il sistema è fermo);
- ▶ si trova in condizioni di **isolamento termico perfetto** (se non lo fosse non sarei in grado di misurare il calore scambiato perché ancora sto definendo l'energia interna, lo potrò fare solo dopo questa definizione);
- ▶ **se vale la conservazione dell'energia**;

allora tutto il lavoro scambiato fra sistema e ambiente (= **lavoro dissipato**) è andato in aumento dell'energia interna del sistema, e posso quindi dare la seguente **definizione operativa**:

$$\Delta U \equiv U_B - U_A = L_{diss} = -\Delta E_{tot}^{est}$$

*"La variazione dell'energia interna di un corpo tra uno stato di equilibrio termodinamico A e uno stato di equilibrio termodinamico B è uguale (per definizione) al lavoro dissipato sul corpo per portarlo dallo stato di equilibrio termodinamico A allo stato B in condizioni di isolamento termico (e senza variarne l'energia meccanica, ecc.)"*



## Bilancio energetico (IN/OUT) - condizioni adiabatiche

Per un corpo che interagisce con l'esterno **in condizioni di isolamento termico** il bilancio energetico è:

$$\Delta U = L_{diss} = L_{est} - L_{sis}$$

$$\left[ \begin{array}{l} \text{aumento } U \\ \text{di un corpo} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{l} \text{lavoro fatto} \\ \text{dall'esterno} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{l} \text{lavoro (eventualmente)} \\ \text{restituito dal corpo} \\ \text{all'esterno} \end{array} \right]$$

Vedremo che questo bilancio si modifica se il corpo nel passare dallo stato di equilibrio termodinamico A allo stato di equilibrio termodinamico B non è isolato termicamente dall'esterno (bisognerà considerare il calore scambiato con l'ambiente).



# Consistenza della definizione

Si verifica che il lavoro dissipato è sempre lo stesso qualunque sia il processo o l'insieme di processi che portano il corpo dallo stato A allo stato B, perciò

**U(P) è una funzione di stato:**

- ▶ U(P) dipende solo dagli estremi A e B della trasformazione, e non da come questa venga realizzata;
- ▶ U(P) vale zero in una trasformazione ciclica;
- ▶ analogia con l'energia potenziale...ecco perché simbolo U.



## Parte II

### Trasformazioni in isolamento termico ( $Q = 0$ )



# Il mulinello di Joule

Come si può dissipare lavoro su un corpo?

- ▶ dispositivo (frullino) che consente di trasferire energia interna ad un corpo mediante dissipazione di lavoro per attrito;
- ▶ cilindro a pareti adiabatiche e pistone isolante;
- ▶ pistone attraversato da asse ruotante con palette;
- ▶ **sistema termodinamico**: gas, liquido o solido finemente polverizzato;
- ▶ **meccanismo di dissipazione**: sfregamento reciproco delle varie parti del corpo agitate dal mulinello



Figura: mulinello di Joule (ca. 1845)



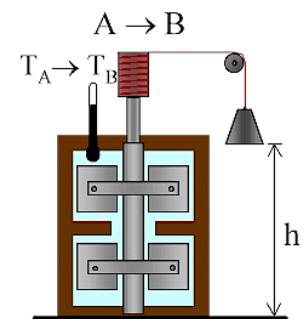
- ▶ **rotazione asse**: tramite dispositivo meccanico o collegato ad un motore che eroga una certa potenza costante;
- ▶ **due modalità**: a volume costante e a pressione costante;
- ▶ **esempio**: volume costante ( $L_{sis} = 0$ ) e massa  $M$  che cade da altezza  $h$ , sia  $\Delta E_{cin}$  variaz. energia cinetica,  $\Delta E_{pot} = -Mgh$  (lavoro forza peso cambiato di segno), allora

$$\Delta E_{mecc} = -Mgh + \Delta E_{cin}$$

è l'energia esterna dissipata, perciò:

$$\begin{aligned}\Delta U &= L_{diss} = L_{est} - L_{sis} = L_m = \\ &= -\Delta E_{mecc} = Mgh - \Delta E_{cin}\end{aligned}$$

con  $L_m$  indico il lavoro esterno, e  $L_{sis} = 0$



## Dettagli sull'esperimento descritto

- ▶ si è trascurata l'energia cinetica acquistata dal mulinello;
- ▶ l'isolamento non può mai essere perfetto o comunque non per un tempo molto lungo: fra gli accorgimenti per minimizzare le perdite vi è massa sostanza » massa oggetti perturbanti (pareti, pistone, palette);
- ▶ le palette nel mescolare fanno aumentare la velocità media delle molecole della sostanza (es. acqua) e questa aumenta di temperatura;
- ▶ il lavoro viene dissipato per attrito viscoso, che aumenta al crescere della velocità delle palette: nella caduta, il pesetto prima aumenta di velocità accelerando secondo  $\vec{g}$  ma poi, quando l'attrito diventa uguale in modulo alla forza peso che agisce sulla massa  $M$ , scende con velocità costante, misurabile;
- ▶ l'energia cinetica finale è quindi minore di quella iniziale;

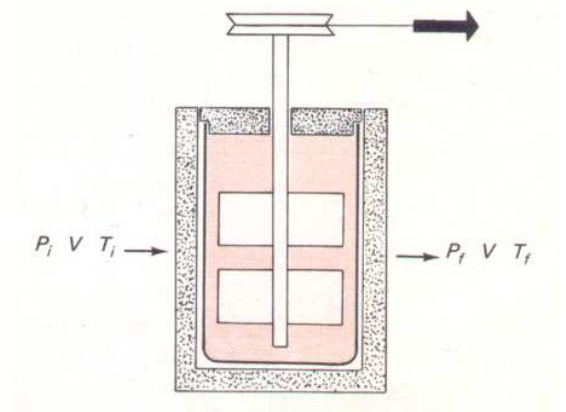


## $\Delta U$ in una trasf. isocora in isolamento termico ( $Q = 0$ )

trasformazione isocora ( $V = \text{cost.}$ )

pistone bloccato  $\rightarrow \Delta V = 0 \rightarrow L_{sis} = 0$

$$\begin{aligned}\Delta U &\equiv U_B - U_A = L_{diss} = \\ &= L_{est} - L_{sis} = L_m = -\Delta E_{mecc}^{est}\end{aligned}$$



# Capacità termica e calore specifico a $V = \text{cost.}$

Si constata sperimentalmente che dissipando lavoro sulla sostanza nel cilindro a  $V = \text{cost.}$  si hanno:

- ▶  $\Delta T > 0;$
- ▶  $\Delta T \propto L_m$  per  $\Delta T$  non troppo grande, scrivo  $L_m = C_V \Delta T;$

il **coefficiente di proporzionalità** è noto come:

CAPACITÀ TERMICA A  
 $V = \text{COST.}$

CALORE SPECIFICO A  
 $V = \text{COST.}$

$$C_V := \left( \frac{L_m}{\Delta T} \right)_V$$

$$c_V := \left( \frac{L_m}{m \Delta T} \right)_V = \frac{C_V}{m}$$

il **calore specifico**  $c_V$  esprime "l'aumento dell'energia interna della massa unitaria della sostanza quando la sua temperatura aumenta di un grado, mantenendo costante il volume"

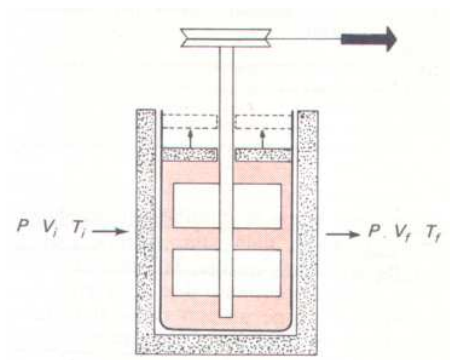


## $\Delta U$ in una trasf. isobora in isolamento termico ( $Q = 0$ )

trasformazione isobara ( $P = \text{cost.}$ )

pistone mobile (soggetto a  $P = \text{cost.}$ ) →  
espansione →  $L_{sis} = P \Delta V$

$$\begin{aligned} \Delta U &\equiv U_B - U_A = L_{diss} = \\ &= L_{est} - L_{sis} = L_m - P \Delta V = -\Delta E_{mecc}^{est} \end{aligned}$$



# Capacità termica e calore specifico a $P = \text{cost.}$

Si constata sperimentalmente che dissipando lavoro sulla sostanza nel cilindro a  $P = \text{cost.}$  si hanno:

- ▶  $\Delta T > 0;$
- ▶  $\Delta T \propto L_m$  per  $\Delta T$  non troppo grande, scrivo  $\Delta L_m = C_P \Delta T;$

il **coefficiente di proporzionalità** è noto come:

CAPACITÀ TERMICA A  
 $P = \text{COST.}$

CALORE SPECIFICO A  
 $P = \text{COST.}$

$$C_P := \left( \frac{L_m}{\Delta T} \right)_P$$

$$c_P := \left( \frac{L_m}{m \Delta T} \right)_P = \frac{C_P}{m}$$

il **calore specifico**  $c_P$  esprime "la quantità di energia che è necessario fornire all'unità di massa della sostanza per aumentarne la temperatura di un grado a pressione costante"



## Riassumiamo il caso dell'isolamento termico ( $Q = 0$ )

$$\Delta U \equiv U_B - U_A = L_{diss} = L_{est} - L_{sis} = -\Delta E_{mecc}^{est}$$

Trasf. isocora ( $V = \text{cost.}$ )

$$\Delta U = L_m = mc_V \Delta T$$

Trasf. isobara ( $P = \text{cost.}$ )

$$\Delta U = L_m - L_{sis} = mc_P \Delta T - P \Delta V$$

- ▶ **morale:** stabilita la def. operativa di  $\Delta U$  gli esperimenti mostrano come essa sia esprimibile in termini dei parametri termodinamici del corpo;
- ▶ tale espressione si formula attraverso coefficienti caratteristici della sostanza;



- ▶  $c_p$  e  $c_v$  delle varie sostanze si determinano sperimentalmente in base alle relazioni che li definiscono;
- ▶ il termine «calore» specifico è dovuto a ragioni storiche;
- ▶  $c_p$  e  $c_v$  esprimono semplicemente l'energia necessaria per far compiere all'unità di massa della sostanza certe trasformazioni;
- ▶ essi sono praticamente indipendenti dalla P e dipendono, anche se non fortemente, dalla T;
- ▶ per l'**aria** e per l'**acqua** sono entrambi dell'ordine di:

$$c \simeq 10^3 \frac{J}{kgK}$$



## Parte III

### Trasformazioni a $L_{est} = 0$ e contatto termico



# Cosa vogliamo fare ora

## scopo:

- ▶ mostrare che dall'esterno si può comunicare energia interna al sistema senza effettuare lavoro su di esso, ma solo per contatto termico con un corpo a temperatura superiore;
- ▶ questo ci porterà ad una definizione chiara di calore;

## strategia:

- ▶ 'impongo'  $L_{est} = 0$  e metto il cilindro a contatto con una fiamma;
- ▶ confronto la  $\Delta U$  che si ricava in questo caso con quella ricavata in condizioni di isolamento termico;
- ▶ raggiunta la  $T_f$  voluta isolo nuovamente il sistema (altrimenti la temperatura continuerebbe a variare);
- ▶ confronto trasformazioni in isolamento termico che portano il sistema da uno stato iniziale  $A(P_i, V_i, T_i)$  ad uno stato finale  $B(P_f, V_f, T_f)$ , con trasformazioni in contatto termico e  $L_{est} = 0$  che avvengono tra **gli stessi stati** A e B;
- ▶ nelle due trasformazioni  $\Delta U \equiv \Delta U_B - \Delta U_A$  è la stessa.



## Bilancio energetico (IN/OUT) - contatto termico

Per un corpo che interagisce con l'esterno in condizioni di **contatto termico** e in assenza di lavoro effettuato dall'esterno sul sistema, il bilancio energetico è:

$$\left[ \begin{array}{l} \text{aumento } U \\ \text{di un corpo} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{l} \text{energia interna} \\ \text{trasferita al corpo} \\ \text{per contatto termico} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{l} \text{lavoro (eventualmente)} \\ \text{restituito dal corpo} \\ \text{all'esterno} \end{array} \right]$$

per comodità (e per motivi storici) il primo termine del membro di destra lo si indica con il **simbolo**  $Q$  e viene chiamato **quantità di calore** scambiato con l'ambiente; si scrive perciò:

$$\Delta U \equiv U_B - U_A = Q - L_{sis}$$



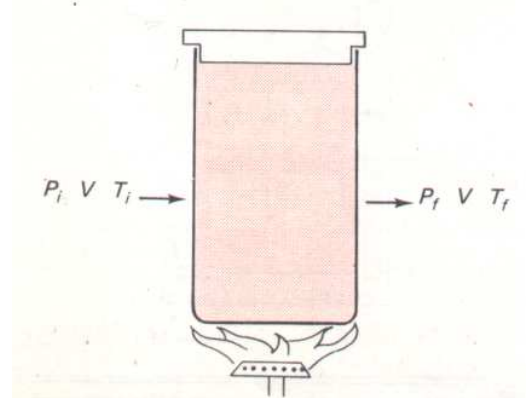


## $\Delta U$ in una trasf. isocora a contatto termico e $L_{est} = 0$

trasformazione isocora ( $V = cost.$ )

pistone bloccato  $\rightarrow \Delta V = 0 \rightarrow L_{sis} = 0$

$$\begin{aligned}\Delta U &\equiv U_B - U_A = Q - L_{sis} = \\ &= Q = mc_v \Delta T\end{aligned}$$

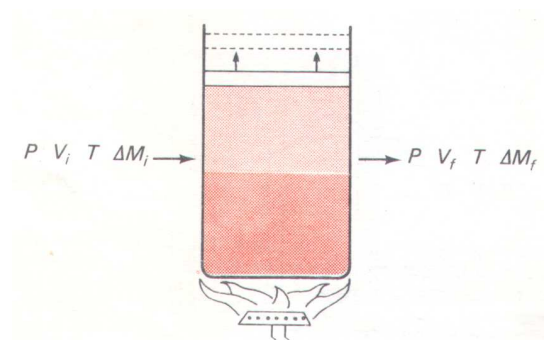


## $\Delta U$ in una trasf. isobara a contatto termico e $L_{est} = 0$

trasformazione isobara ( $P = cost.$ )

pistone mobile (soggetto a  $P = cost$ )  $\rightarrow$   
espansione  $\rightarrow L_{sis} = P\Delta V$

$$\begin{aligned}\Delta U &\equiv U_B - U_A = Q - L_{sis} \\ &= Q - P\Delta V = mc_p \Delta T - P\Delta V\end{aligned}$$



# Riassumendo

”Il passaggio da uno stato termodinamico iniziale di un corpo a uno stato finale, realizzato dissipando sul corpo energia meccanica in condizioni di isolamento termico, può anche essere conseguito senza dissipare alcun lavoro ma ponendo il corpo in contatto termico con un corpo più caldo (ad esempio, una fiamma).

I due processi sono diversi, ma la variazione dell’energia interna del corpo è la stessa, perché nei due casi lo stesso è lo stato iniziale e lo stesso è lo stato finale.

Nel primo caso viene conferita al corpo energia interna dissipando lavoro; nel secondo caso la stessa quantità di energia interna gli viene comunicata trasferendogli, per contatto termico, energia interna di un altro corpo (ad esempio, una fiamma).



L’energia interna trasferita per contatto termico si chiama anche calore. Non ha però alcun senso parlare di «calore contenuto in un corpo» né di «calore posseduto da un corpo» locuzioni di uso frequente nel linguaggio comune. In termodinamica, la parola **calore** ha esclusivamente il significato di «**energia interna in transito**» ”

*G. Manuzio e G. Passatore, "Verso la Fisica", volume 2, ed. Principato, 1984*



# Tabella riassuntiva

- ▶ Abbiamo ricavato  $\Delta U$  fra due stessi stati di equilibrio termodinamico nei due casi di isolamento termico e contatto termico senza lavoro dall'esterno, per i due tipi di trasformazioni: isocora e isobara.
- ▶ Riassumiamo i risultati (dizione 'calori specifici' perché...):

ISOCORA	isolamento termico ( $Q = 0$ )	contatto termico (e $L_{est} = 0$ )
	$\Delta U = L_{est}$ $L_{est} = C_V(T_f - T_i)$	$\Delta U = Q$ $Q = C_V(T_f - T_i)$
	$\Delta U = C_V(T_f - T_i)$	
ISOBARA	$\Delta U = L_{est} - P\Delta V$ $L_{est} = C_P(T_f - T_i)$	$\Delta U = Q - P\Delta V$ $Q = C_P(T_f - T_i)$
	$\Delta U = C_P(T_f - T_i) - P(V_f - V_i)$	



## Parte IV

### Il I Principio della Termodinamica



# Il I Principio della Termodinamica

Se si considera una generica trasformazione nelle condizioni in cui il corpo non sia isolato né termicamente né meccanicamente dall'esterno, allora, in generale:

- ▶ dall'esterno può essere fatto lavoro sul corpo e il corpo può fare lavoro verso l'esterno;
- ▶ tra il corpo e l'ambiente può avvenire scambio di energia interna per contatto termico, ossia può aversi passaggio di calore;
- ▶ il bilancio energetico di una tale trasformazione, nella quale l'energia interna di un corpo possa variare sia a causa di lavoro, sia a causa di scambio di energia interna con l'ambiente per contatto termico, costituisce il **primo principio della termodinamica**:

$$\Delta U = L + Q$$



## Termini di calore e lavoro

### CALORE

**Q**: energia scambiata fra corpi in contatto termico quando fra loro esiste una differenza di temperatura

- ▶ Q è la quantità di calore passata tra il corpo e l'ambiente
- ▶ **assumiamo**:  $Q > 0$  se il calore è passato dall'ambiente al corpo

### LAVORO

**L**: lavoro scambiato tra il corpo e l'ambiente

- ▶ L è la differenza tra il lavoro fatto dall'esterno sul corpo e quello fatto dal corpo verso l'esterno;
- ▶ **assumiamo**:  $L > 0$  se il lavoro fatto dall'esterno sul corpo è maggiore di quello fatto dal corpo verso l'esterno



# La conservazione dell'energia

Nel caso più generale la **conservazione dell'energia** si esprime con la relazione:

$$\Delta E_{tot}^{sis} \equiv \Delta E_{macro}^{sis} + \Delta U^{sis.} = Q + L = -\Delta E_{tot}^{amb}$$
$$\Delta E_{tot} = \Delta E_{tot}^{sis} + \Delta E_{tot}^{amb} = 0 \iff E_{tot} = cost.$$

dove  $\Delta E_{macro}$  comprende l'energia meccanica del sistema o altri eventuali termini energetici (energia chimica, energia elettromagnetica, ecc.); se varia soltanto l'energia termica del corpo allora il principio di conservazione è espresso dalla relazione:

$$\Delta U \equiv U_f - U_i = Q + L$$



## Osservazioni finali

Il primo principio della termodinamica si fonda dunque sui seguenti concetti:

- ▶ l'energia interna è una funzione di stato;
- ▶ l'energia interna può variare per scambio di lavoro e per contatto termico con l'esterno (se esiste una differenza di temperatura fra il corpo e l'ambiente);
- ▶ l'energia si conserva: l'energia totale di corpo e ambiente resta costante nel tempo.



# Riferimenti

Il presente lavoro trae ispirazione dal testo:

*G. Manuzio e G. Passatore, "Verso la Fisica", volume 2, ed. Principato 1984;*

dal quale sono tratte le immagini relative alle quattro trasformazioni termodinamiche discusse.

Le immagini del mulinello di Joule sono tratte, rispettivamente, da:

[http://en.wikipedia.org/wiki/James\\_Prescott\\_Joules](http://en.wikipedia.org/wiki/James_Prescott_Joules);

[http://science.unitn.it/~fisical/fisical/appunti/termo/cap\\_3/cap\\_3\\_4.htm](http://science.unitn.it/~fisical/fisical/appunti/termo/cap_3/cap_3_4.htm)



## GNU Free Documentation Licence (GFDL)

Potete trovare il testo originale in inglese della *GNU Free Documentation Licence* sul sito del progetto GNU:

<http://www.gnu.org/>

alla pagina:

<http://www.gnu.org/licenses/fdl.html>

oppure sul sito della Free Software Foundation:

<http://www.fsf.org/>

alla pagina:

<http://www.fsf.org/licensing/licenses/fdl.html>

una traduzione in italiano della licenza è disponibile all'indirizzo:

<http://www.softwarelibero.it/gnudoc/fdl.it.html>

