$$[B] \qquad q + L_e = \Delta\frac{mv_{CM}^2}{2} + \Delta U = \Delta\frac{mv_{CM}^2}{2} + \Delta EC_i + \Delta EP_i .$$

Si arriva alla [B] scrivendo che il calore fornito, il lavoro delle forze esterne e il lavoro delle forze interne producono energia cinetica:

$$q + L_e + L_i = \Delta(mv_{CM}^2/2) + \Delta EC_i$$

e ponendo $-\Delta EP_i = L_i$. È chiaro che, in tali relazioni, il calore q dovrebbe considerarsi negativo se si trattasse di calore *sottratto* al sistema; e che, a seconda dei casi, il lavoro L_e delle forze esterne potrà a sua volta risultare positivo o negativo.

5. Consideriamo ad esempio un blocco che, in presenza di attrito, scivola verso il basso lungo un piano inclinato. Possiamo ragionevolmente supporre che il blocco, che – come il piano inclinato – si riscalda per attrito, e che viene via via in contatto con parti del piano inclinato non ancora sottoposte ad attrito, ceda calore al piano inclinato. Considerando irrilevanti le variazioni dell'energia potenziale interna (dovute alla dilatazione del blocco per effetto termico), per il primo principio della termodinamica possiamo ritenere che per il blocco risulti

$$[C] \qquad mgh + L'_a - q = \Delta\frac{mv^2}{2} + \Delta E'_t$$

dove m è la massa del blocco, h la distanza verticale tra posizione iniziale e posizione finale, L'_a il lavoro (negativo) delle forze di attrito applicate al blocco, q il calore che il blocco ha ceduto al piano inclinato, $\Delta E'_t$ l'incremento dell'energia termica del blocco[5]. Per il piano inclinato sarà invece

---

$= \sum V_i^2 + \sum v_{i(t)}^2$. A causa infatti del totale disordine delle velocità termiche, la somma delle relative componenti $v_t \cos\varphi$ in una qualsivoglia particolare direzione (qui, nella direzione della velocità d'assieme delle particelle) è necessariamente zero. Se ora applichiamo tale ragionamento a tutte le molecole che hanno una stessa massa m, ciò che si è detto per il quadrato delle velocità può essere subito esteso alle energie cinetiche, col che la tesi resta dimostrata.

[5] Si noti che, contrariamente a quanto potrebbe sembrare a prima vista, il lavoro delle forze d'attrito sul blocco non è $\Delta(mv^2/2) - mgh$, ma $\{\Delta(mv^2/2) - mgh\} + \Delta E'_t + q$. Il termine entro parentesi graffa è negativo, e corrisponde a energia cinetica sottratta al blocco a livello del moto d'assieme. Il termine $\Delta E'_t$ è positivo, e corrisponde a energia cinetica che compare nel blocco a livello microscopico (come effetto ultimo delle deformazioni che le forze di attrito producono temporaneamente sulla superficie del blocco nei punti di contatto con la superficie dello scivolo). Se all'abbassamento h del blocco corrisponde uno spostamento d, la relazione $mgh - F_a d = \Delta(mv^2/2)$ consente senz'altro il calcolo della velocità acquisita dal CM (e in questo caso dall'intero blocco), dato che la velocità del CM può essere calcolata assumendo che tutte le forze siano applicate ad esso, e dato che esso subisce lo spostamento d. Tuttavia la grandezza $-F_a d$ *non rappresenta* il lavoro della forza d'attrito (dato invece da $-F_a d + \Delta E'_t + q$). Evidentemente, lo spostamento effettivo d' dei punti d'applicazione della forza d'attrito (lo spostamento che determina l'effettivo valore del lavoro d'attrito) è in questo caso *inferiore* allo spostamento macroscopico d del blocco: il modello del corpo rigido (secondo il quale la forza d'attrito lavora su una distanza d) rende conto della velocità acquisita dal blocco, ma non dell'effetto di riscaldamento.

[D] $$L''_a + q = \Delta E''_t$$

dove $\Delta E''_t$ è l'incremento dell'energia termica. Per il sistema «blocco + scivolo» il bilancio energetico sarà

[E] $$mgh = \Delta\frac{mv^2}{2} + \Delta E'_t + \Delta E''_t .$$

Infine, per l'universo risulta

[F] $$0 = \Delta\frac{mv^2}{2} + \Delta E'_t + \Delta E''_t - mgh$$

dove l'ultimo termine esprime la perdita di energia potenziale gravitazionale interna conseguente al lavoro effettuato dal peso del blocco.

Osservazione. Dato che sommando i secondi membri della [C] e della [D] si ottiene il secondo membro della [E], lo stesso deve valere per i primi membri. Ciò richiede che sia $L'_a + L''_a = 0$ (il che si può spiegare ipotizzando che i punti del blocco che vengono a effettivo contatto con lo scivolo si saldino momentaneamente a punti dello scivolo, subendo di conseguenza spostamenti identici). Questo risultato ha carattere generale: *il lavoro complessivo delle forze d'attrito interne a un sistema è sempre zero* (perciò non modifica l'energia cinetica complessiva delle particelle del sistema, semplicemente la trasferisce dal moto ordinato d'assieme al moto disordinato di agitazione termica[6]).

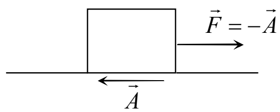

Fig. 2

6. A ulteriore chiarimento, si consideri il seguente esempio numerico: un blocco viene trainato lungo una tavola orizzontale, in presenza di attrito, da una forza motrice $\vec{F}$ uguale, in modulo, alla forza d'attrito $\vec{A}$ (fig. 2). Non agiscono altre forze, cosicché la velocità del blocco si mantiene costante. Da un punto di vista macromeccanico dovremmo dire che a un ipotetico lavoro 100 (unità arbitrarie) della forza motrice corrisponde un lavoro –100 della forza d'attrito applicata al blocco, e un lavoro 0 della forza d'attrito applicata alla tavola. Se invece teniamo conto degli aspetti termici, il bilancio cambia completamente. Ritenendo di poter trascurare il calore trasmesso da un corpo all'altro, il bilancio potrebbe per esempio essere: per il blocco, lavoro forza motrice 100, lavoro attrito –70, energia termica prodotta 30; per la tavola, lavoro attrito +70, energia termica prodotta 70 (se le due superfici a contatto avessero identiche caratteristiche fisiche, per ragioni di simmetria l'energia termica prodotta per attrito – legata alle deformazioni subite dai due corpi sulle superfici a contatto – risulterebbe uguale nei due corpi).

6 Ciò si giustifica considerando che ciò che chiamiamo «attrito» è in realtà l'effetto globale di un grande numero di interazioni elementari conservative (urti elastici) tra particelle che prima entrano l'una nella sfera d'azione dell'altra e poi ne escono, con un lavoro complessivo delle forze di interazione uguale a zero.

Nel riferimento (inerziale) del blocco, il blocco è immobile e la tavola si sposta con velocità costante verso sinistra sotto l'azione di una forza d'attrito $-\vec{A}$ esercitata su di essa dal blocco (e di una forza motrice $-\vec{F}$ uguale e contraria). A differenza del lavoro d'attrito, il cui valore dipende dagli spostamenti (diversi nei diversi riferimenti) del blocco e della tavola, l'energia termica prodotta è chiaramente la stessa in qualsiasi riferimento. Il bilancio energetico diventa pertanto: per il blocco, energia termica prodotta 30, lavoro d'attrito +30; per la tavola, energia termica prodotta 70, lavoro d'attrito −30, lavoro della forza motrice +100.

7. Se, come avviene praticamente sempre, si considerano processi termodinamici che hanno inizio e termine con stati di equilibrio (meccanico e termodinamico), nella [B] il termine $\Delta(mv_{\mathrm{CM}}^2/2)$ è zero, e il primo principio della termodinamica assume la forma

[G] $\quad q + L_{\mathrm{e}} = \Delta U$

dove è sottinteso che, essendo stati di equilibrio sia quello iniziale che quello finale, l'energia cinetica contenuta nel termine ΔU è soltanto l'energia termica (l'energia interna U ha quindi il carattere di energia *termodinamica* interna). Nel caso di trasformazioni che si ritiene di poter schematizzare come reversibili, *e solo in tale caso*, la relazione [G] può essere anche riferita al passaggio da un qualsiasi stato intermedio allo stato immediatamente successivo, trattandosi in ogni caso di stati di equilibrio. In tale eventualità la [G] coinvolge grandezze infinitesime, e assume la forma differenziale

[H] $\quad \delta q + \delta L_{\mathrm{e}} = \mathrm{d}U$[7].

8. Essendo l'energia interna di un sistema di particelle la somma dell'energia cinetica complessiva e dell'energia potenziale associata a tutte le interazioni tra particelle, appare prevedibile che ad ogni stato micromeccanico di un sistema (distribuzione spaziale delle particelle, velocità delle particelle), e di riflesso ad ogni suo stato termodinamico, debba corrispondere uno stato energetico ben preciso. In altre parole, ci aspettiamo che l'energia interna sia una *funzione di stato*, una funzione cioè il cui valore è univocamente definito dallo stato in cui un sistema si viene a trovare, senza dipendenza alcuna dalle trasformazioni che a tale stato hanno condotto. In effetti, nel caso di una trasformazione termodinamica tra stati di equilibrio la quantità $q + L_{\mathrm{e}}$ (uguale, a norma del primo principio, all'incremento ΔU dell'energia interna) risulta sempre dipendere solo dallo stato iniziale e dallo stato finale del sistema, non dal particolare percorso tra lo stato iniziale e quello finale. *Ciò costituisce la convalida sperimentale del primo principio*.

---

7 Al solito, il simbolo δ indica differenziali non esatti, e cioè quantità infinitesime che dipendono non solo dagli stati iniziale e finale del sistema, ma anche dalle particolari modalità della trasformazione.