

Lezione 24: Equilibrio termico e calore

24.1. Antiche spiegazioni: il calorico

Abbiamo visto che, mettendo in contatto un corpo caldo con uno freddo, si avvia un processo che ha termine quando i due corpi raggiungono la situazione di equilibrio termico, in cui le loro temperature sono uguali. Durante questo processo avviene uno scambio tra i due corpi: ma che cosa, esattamente, viene scambiato?

Una teoria in voga fino ai primi dell'Ottocento sosteneva trattarsi di calorico, ovvero un fluido dalle proprietà sorprendenti: prima tra tutte quella di essere imponderabile, cioè privo di peso. Infatti quando un corpo si raffredda il suo peso non diminuisce!

La temperatura, secondo questa teoria, era una misura del livello raggiunto dal calorico contenuto in un corpo. Per capire questo punto conviene considerare l'analogia con recipienti che contengono acqua (► fig.24.1)



Fig.24.1 Un'analogia con recipienti che contengono acqua. Il recipiente A contiene più acqua del recipiente B. Eppure, quando li mettiamo in comunicazione, l'acqua passa da B ad A.

L'acqua non passa dal recipiente che ne contiene di più a quello che ne contiene di meno. Piuttosto, passa dal recipiente in cui il livello è maggiore a quello in cui il livello è minore. Analogamente, il calorico non passa dal corpo che ne contiene di più a quello che ne contiene di meno, ma da quello in cui raggiunge il livello più alto (che cioè si trova a una temperatura maggiore) all'altro.

Per scaldare una stanza in una giornata d'inverno, ad esempio, funziona benissimo un radiatore pieno d'acqua calda, mentre a nessuno verrebbe in mente di scaldarla tenendo accesa la fiamma di un accendino. La spiegazione che poteva darvi un sostenitore dell'idea di calorico era questa: l'acqua calda nel radiatore è tanta, quindi contiene molto più calorico della fiamma. Tuttavia il livello del calorico è più alto nella fiamma, che infatti scotta molto più dell'acqua calda

Se prendiamo una grossa vite, tenendola ben ferma con un paio di pinze, e proviamo a limarne la testa, a lungo e con vigore, ci accorgiamo che dopo un po' la testa della vite scotta. Il problema, per chi crede alla teoria del calorico, è spiegare che cosa ha prodotto gli aumenti di temperatura. All'inizio dell'esperimento vite e lima erano entrambe alla stessa temperatura, cioè quella dell'ambiente: perciò nessuno dei due oggetti può aver ceduto calorico all'altro. Non solo: si sono riscaldati sia la vite sia la

lima. Sembra proprio che il calorico, oltre ad essere privo di peso, abbia la curiosa proprietà di poter essere prodotto in quantità illimitate semplicemente sfregando due oggetti.

24.2. La spiegazione moderna

La teoria del calorico è stata definitivamente abbandonata intorno alla metà dell'Ottocento. Il processo che porta al raggiungimento dell'equilibrio termico oggi lo spieghiamo così: "il corpo più caldo cede calore a quello più freddo, finché le due temperature non diventano uguali". Se fosse soltanto una questione di nomi, la differenza sarebbe davvero minima: da calorico a calore. La differenza, viceversa, è sostanziale: oggi sappiamo che il calore è uno dei modi in cui due corpi possono scambiare energia. Precisamente:

si chiama calore l'energia in transito da un corpo più caldo ad uno più freddo, quando lo scambio è dovuto soltanto alla differenza di temperatura.

Le molecole di un corpo più caldo hanno un'energia di movimento che in media è superiore rispetto a quelle di un corpo più freddo. Quando mettiamo in contatto i due corpi, avvengono urti tra le rispettive molecole. Il risultato di questi urti è che le molecole più energetiche subiscono, in media, una diminuzione di energia. Viceversa quelle meno energetiche subiscono, in media, un aumento di energia.

24.3. Calore e lavoro, due modi per scambiare energia

Ciò che abbiamo chiamato calore è quindi un modo per scambiare energia tra i corpi. Nella lezione 14 avevamo introdotto un'altra modalità di scambio per l'energia, che avevamo chiamato lavoro: il corpo A esercita una forza sul corpo B e, se ciò è accompagnato da uno spostamento del corpo B, allora sul corpo B viene compiuto un lavoro. Abbiamo inoltre visto come questo lavoro può tradursi in variazioni dell'energia meccanica (cinetica, o potenziale) del corpo B.

Non sempre, però, il lavoro compiuto su di un corpo si traduce in una variazione della sua energia meccanica. Pensate a questo esempio: il corpo A è una lima, il corpo B un pezzo di metallo che dovete limare. A esercita una forza su B (è una forza d'attrito), e c'è anche uno spostamento del punto in cui la forza agisce: possiamo dunque calcolare il lavoro compiuto. Tuttavia questo lavoro non provoca una variazione di energia meccanica del pezzo: tutto quel che accade è che esso si scalda. Il lavoro compiuto in questo caso, cioè l'energia trasferita a causa di una forza che sposta il punto in cui è applicata, produce un aumento dell'energia cinetica media delle molecole di cui è composto il pezzo che stiamo limando. Otteniamo un trasferimento di energia equivalente a quello che avremmo avuto ponendo B in contatto con un corpo più caldo.

Dal nostro esempio possiamo quindi dedurre che lavoro e calore sono entrambi modi per trasferire energia da un corpo ad un altro.

24.4. Un modello matematico per la temperatura di equilibrio

In questo e nei prossimi paragrafi studieremo in dettaglio il modo in cui viene raggiunto l'equilibrio termico. L'obiettivo finale è quello di imparare a calcolare quanta energia viene scambiata da un corpo quando la sua temperatura cambia.

Consideriamo per prima cosa la situazione in cui due masse uguali della stessa sostanza (per esempio acqua), inizialmente a temperature diverse, vengono mescolate insieme.

Sia T_1 la temperatura dell'acqua fredda, T_2 quella dell'acqua calda, T_e la temperatura di equilibrio. Poichè stiamo parlando di due masse uguali, è facile immaginare quale sarà la temperatura di equilibrio: semplicemente la media aritmetica delle due. Gli esperimenti confermano questa ipotesi: davvero la temperatura di equilibrio è

$$T_e = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

L'esperimento è facile da fare: basta una bilancia digitale da cucina, che di solito ha la sensibilità di 1 g. Si può anche usare un recipiente graduato, ma la sua sensibilità è inferiore. Prendiamo, in due contenitori diversi, 250 g d'acqua in ciascuno. L'acqua nel primo contenitore la lasciamo alla temperatura ambiente, quella nel secondo la scaldiamo su un fornello. Un attimo prima di mescolare, si misurano le rispettive temperature T_1 e T_2 , poi si mescola velocemente, e si misura la temperatura di equilibrio T_e . Provate a fare l'esperimento: il risultato è vicino a quello previsto dal modello della media aritmetica? Perché abbiamo detto che bisogna essere veloci nel mescolare e misurare la temperatura di equilibrio?

24.5. Complichiamo il modello

Consideriamo ora la situazione in cui mescoliamo due masse d'acqua diverse m_1 e m_2 , rispettivamente a temperatura T_1 e T_2 . Certamente anche in questo caso la temperatura di equilibrio dovrà essere compresa tra T_1 e T_2 , ma non starà a metà strada tra le due, come accadeva nel caso precedente. Al contrario, la temperatura di equilibrio sarà più vicina a quella delle due che corrisponde alla massa d'acqua più grande. Un semplice modello matematico che traduce questa idea è quello di media pesata. I pesi che usiamo per calcolare la media sono naturalmente le masse m_1 e m_2 : questo significa che se la massa dell'acqua a temperatura T_1 è il doppio di quella a temperatura T_2 , allora T_e sarà due volte più vicina a T_1 che a T_2 . La formula è perciò:

$$T_e = \frac{m_1 T_1 + m_2 T_2}{m_1 + m_2}$$

Possiamo mettere alla prova il modello con un esperimento simile al precedente. Questa volta, però, lavoriamo con 400 g di acqua fredda, e solo 200 g di acqua calda. Un attimo prima di mescolare, misuriamo le rispettive temperature T_1 e T_2 , poi mescoliamo, e misuriamo la temperatura di equilibrio T_e .

24.6. Il modello per sostanze diverse

Come ultimo passo, consideriamo quello che accade se mettiamo in contatto termico due sostanze diverse. Per esempio, un blocco di metallo caldo (di massa m_1 e temperatura T_1) che viene immerso in acqua fredda (di massa m_2 e temperatura T_2). Anche in questo caso si tratterà di calcolare una media pesata tra T_1 e T_2 , ma i pesi non dipenderanno solo dalla massa, bensì anche dal tipo di sostanza che si trova a quella temperatura.

Introduciamo allora un nuovo "peso", che indichiamo con il simbolo c e che si chiama calore specifico. Più avanti capiremo meglio il significato fisico di questa grandezza, per ora è importante capire che il calore specifico assume un valore caratteristico a seconda della sostanza considerata. Il ferro, ad esempio, ha un valore di calore specifico che è circa un decimo di quello dell'acqua: questo vuol dire che la temperatura di equilibrio tra masse uguali di ferro e di acqua, è dieci volte più vicina a quella dell'acqua che a quella del ferro.

Fatte queste precisazioni, ecco dunque il modello matematico che descrive la situazione che stiamo considerando:

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

24.7. Un bilancio termico

In questo paragrafo vogliamo trasformare l'equazione che abbiamo appena ricavato in un'altra equivalente, nella quale siano separati i termini che riguardano la prima sostanza, nel nostro esempio il metallo, da quelli che riguardano la seconda sostanza, in questo caso l'acqua.

$$T_e = \frac{m_1 c_1 T_1 + m_2 c_2 T_2}{m_1 c_1 + m_2 c_2} \quad \text{moltiplichiamo per } m_1 c_1 + m_2 c_2$$

$$T_e \cdot (m_1 c_1 + m_2 c_2) = m_1 c_1 T_1 + m_2 c_2 T_2 \quad \text{distribuiamo la moltiplicazione}$$

$$m_1 c_1 T_e + m_2 c_2 T_e = m_1 c_1 T_1 + m_2 c_2 T_2 \quad \text{separiamo i termini con indice 1 da quelli con indice 2}$$

$$m_1 c_1 T_e - m_1 c_1 T_1 = m_2 c_2 T_2 - m_2 c_2 T_e \quad \text{raccolgiamo i termini simili}$$

$$m_1 c_1 (T_e - T_1) = m_2 c_2 (T_2 - T_e)$$

La differenza $T_e - T_1$ rappresenta la variazione di temperatura subita dal metallo, mentre $T_2 - T_e$ è l'opposto della variazione di temperatura subita dall'acqua. Abbiamo insomma:

$$m_1 c_1 \Delta T_1 = - m_2 c_2 \Delta T_2$$

Il raggiungimento dell'equilibrio termico si può dunque descrivere così: c'è una grandezza, il prodotto $c \cdot m \cdot \Delta T$, il cui bilancio è in pareggio. Tanto una sostanza acquista della grandezza $c \cdot m \cdot \Delta T$, altrettanto ne perde l'altra sostanza.

24.8. Come si calcola l'energia termica

La grandezza $c \cdot m \cdot \Delta T$ è naturalmente l'energia che viene scambiata nell'interazione tra il corpo caldo e il corpo freddo.

Quando un corpo di massa m , fatto di un materiale il cui calore specifico è c , subisce una variazione di temperatura ΔT , la sua variazione di energia è:

$$E = c \cdot m \cdot \Delta T$$

24.9. Che cosa è davvero il calore specifico

Siamo adesso in grado di spiegare con precisione il significato del calore specifico c . Se risolviamo rispetto a c l'ultima equazione troviamo:

$$c = \frac{E}{m \cdot \Delta T}$$

Ne deduciamo che:

il calore specifico c di una sostanza si misura in $\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$, e rappresenta la quantità di energia immagazzinata da un kg di quella sostanza quando aumenta la sua temperatura aumenta di 1°C .