

Sul fluido calorico (a cura del prof. M. Savarese)

Ancora all'inizio dell'800 molti ritenevano che il calore fosse un fluido, al quale avevano dato il nome di *calorico*, in grado di passare da un corpo caldo a uno freddo e che, col suo passaggio, provocasse variazioni di temperatura. La teoria prendeva spunto dalla considerazione abbastanza evidente che mettere a contatto un corpo caldo con uno freddo sia, in un certo senso, come avvicinare due bicchieri contenenti liquidi a diverse altezze. L'altezza del liquido corrisponderebbe alla temperatura mentre la quantità di liquido alla quantità di calore. Se si permette ai liquidi di passare da un bicchiere all'altro si nota che i liquidi si portano allo stesso livello e siccome la cosa avviene anche per due corpi a diverse temperature (che possono anche non trovarsi a contatto) la teoria sembrava molto soddisfacente.

Uno dei punti deboli restava comunque il fatto che questo misterioso fluido dovesse essere imponderabile, ovvero del tutto privo di massa. Infatti un corpo caldo posto su una bilancia, anche la più sensibile, non mostra assolutamente di diventare più leggero man mano che si raffredda. Per di più il calorico doveva possedere anche un certo volume poiché entrando in un corpo riscaldato, provocava un aumento delle sue dimensioni, cioè quel fenomeno che conosciamo bene come dilatazione termica.

Il punto forte della teoria restava in ogni caso che il calorico globalmente si conserva; proprio come fa l'acqua quando viene travasata da un recipiente ad un altro (anche se la forma non resta la stessa). Nella storia della fisica sono frequenti situazioni del genere. Se in una teoria il bilancio è positivo si cerca di mettere una toppa (o di chiudere un occhio) sui lati negativi cercando conferme in quelli positivi. E le conferme ci sono eccome: se si prendono quantità uguali di un liquido caldo e di uno freddo e le si mescola il miscuglio ha temperatura esattamente intermedia. Ma di più, se i liquidi sono di natura differente, introducendo il concetto di capacità termica, tutto torna magnificamente e si riescono a fare un sacco di previsioni che poi possono essere puntualmente confermate da esperimenti. Sono poi i problemini che si assegnano nelle prove di verifica scritte che, in fin dei conti, si risolvono applicando formulette matematiche nelle quali invece delle classiche variabili x e y compaiono altre lettere. Vengono tutti dalla teoria del calorico. Molti termini di cui ancora oggi ci serviamo derivano da essa; infatti diciamo che il calore "passa" da un corpo ad un altro, come fosse una sostanza; e con analogo significato parliamo di "quantità di calore" posseduta da un corpo.

Quello che a me preme sottolineare è che, nonostante la teoria sia completamente sballata (come immagino avrete già intuito), essa permette di risolvere brillantemente tutta una serie di problemi sui bilanci termici. Questo fatto ci fa intuire che in una teoria fisica (e non solo) è bene concentrarsi maggiormente sui fatti che la smentiscono che su quelli che la confermano. Tralasciamo per ora questo delicato aspetto filosofico e proviamo a risolvere qualche problema pratico.

Prob.1) Dopo aver misurato la portata massima della doccia, vogliamo calcolare quanto costa farcene una di 5 min. (il costo di 1 kWh è di 0,18 €, poniamo la temperatura iniziale dell'acqua 15 °C, quella finale 40 °C).

La portata q si misura semplicemente misurando il tempo impiegato a riempire un contenitore di volume noto; il valore tipico è circa 0,3 litri/s; Un chilovattora (kWh) equivale a 3.600.000 Joule ovvero la potenza di 1000 W per il tempo di 1 ora; 5 minuti di doccia corrispondono ad un volume di acqua pari a $V = qt = 0,3 \cdot 5 \cdot 60 = 90$ litri che corrispondono a 90 kg; l'energia necessaria sarà: $E = mc\Delta T = 90 \cdot 4186 \cdot (40 - 15) = 9,4$ MJ; dividendo per 3.600.000 e moltiplicando per 0,18 otteniamo il costo della doccia, pari a $0,18 \cdot 9,4 / 3,6 = 0,47$ € (che non è poco).

Prob. 2) Versiamo 200 g di spaghetti in 5,0 litri di acqua bollente. Misuriamo il tempo che impiega l'acqua per riprendere a bollire e otteniamo 28 s. Quanto vale la potenza assorbita dalla pentola? (nota: poniamo la temperatura ambiente 20 °C e il calore specifico della pasta uguale a quello dell'acqua)

Imponiamo il bilancio termico: $m_f c(T_c - T_f) = m_c c(T_c - T_e)$ da cui ricaviamo la T di equilibrio: $T_c = (m_f T_f + m_c T_e) / (m_f + m_c)$ troviamo poi la potenza assorbita: $P = m_f c \Delta T / t = (5 + 2) * 4186 * (100 - (2 * 20 + 5 * 100)) / ((2 + 5) * 28) = 2,4 \text{ kW}$

Facciamone un altro un po' più complesso:

Prob. 3) Vogliamo fare una doccia ma lo scaldabagno elettrico è spento e l'acqua è fredda ($17,0 \text{ }^\circ\text{C}$ pari a quella della rete idrica). Decidiamo di fare lo stesso la doccia lasciando l'interruttore acceso per minimizzare il danno. Supponendo che la portata sia di $0,250 \text{ litri/s}$ e la potenza dello scaldabagno 1600 W a quale temperatura facciamo la doccia (a regime) ?

La formula fondamentale della calorimetria è $Q = mc\Delta T$; dividendo per il tempo il primo membro Q diventa la potenza P e nel secondo la massa M diventa la portata q , ovvero $P = qc\Delta T$ da cui $\Delta T = P/qc = 1600 / (0,25 * 4186) = 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (facciamo la doccia ad appena $18,5 \text{ }^\circ\text{C}$; ci rendiamo conto che tutta la potenza disponibile in casa, di solito 3 kW , non è sufficiente per fare una doccia ad una temperatura decente);

vi propongo qualche altro problema, di cui do solo il risultato:

Prob. 4) Si vuole costruire uno scaldabagno elettrico che riscaldi l'acqua senza accumularla. Supponiamo che per fare la doccia sia necessaria una portata di $200 \text{ cm}^3/\text{s}$ e una temperatura finale dell'acqua di $38 \text{ }^\circ\text{C}$. Qual è la potenza richiesta? (porre la temperatura iniziale dell'acqua $15 \text{ }^\circ\text{C}$) [risposta: 19 kW]

Prob. 5) Un treno di massa complessiva 600 T viaggia a 90 km/h . Quanto calore viene prodotto dai freni quando la velocità viene ridotta di 10 km/h ? [R= $9,4 \text{ Mcal}$]

Prob. 6) Un tubo di materiale adiabatico, chiuso agli estremi e lungo 100 cm , contiene 250 g di pallini di piombo e per la parte restante è riempito completamente da $1,2 \text{ litri}$ di acqua. Disposto il tubo verticalmente lo si capovolge in modo che i pallini cadano per tutta la sua lunghezza. Quante volte bisogna ripetere l'operazione perché la temperatura dell'acqua aumenti di $1,0 \text{ }^\circ\text{C}$? (calore specifico del piombo = $0,032 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$) [R= 2060]

Torniamo ora al calorico. La concezione del calore come fluido imponderabile che occupa un certo volume e che si conserva cominciò a traballare quando si prese a considerare fenomeni d'attrito. Prendiamo ad esempio la seguente azione semplicissima: ho freddo e per scaldarmi mi sfrego le mani. Da dove proviene il calore? A noi adesso basta questo semplice aneddoto per renderci conto che il calore non può essere considerato come un fluido; a quel tempo però, avendo la teoria ottenuto grandi successi nel risolvere i problemi sui bilanci termici, si cercò a tutti i costi di conservarla mettendoci una "toppa"; l'argomentazione era la seguente: nei fenomeni di attrito il calore è come se fosse "spremuta" dai corpi; un po' come avviene per l'acqua contenuta in una spugna bagnata. La spiegazione non è molto convincente ma spesso in assenza di valide alternative si preferisce una teoria traballante all'ammettere la propria ignoranza.

Uno dei primi a comprendere la vera natura del calore fu l'americano Benjamin Thompson, conte di Rumford (1753 – 1814), un avventuriero americano che lavorava presso l'arsenale militare di Monaco di Baviera. Egli cominciò a dubitare dell'esattezza della teoria mentre osservava un fenomeno nel quale si sviluppa una marea di calore a causa dell'attrito: la fabbricazione di un cannone. La canna del cannone era ricavata da un blocco compatto di ottone che veniva perforato da uno speciale attrezzo simile ad un trapano chiamato alesatore. I trucioli di ottone che cadevano man mano che il foro procedeva erano arroventati. Secondo la teoria accettata, il "calorico" sarebbe stato spremuto dal blocco di ottone a causa dell'intenso sfregamento. La cosa strana era però che il blocco di ottone sembrava essere una sorgente praticamente inesauribile di calore: all'avanzare del foro, infatti, i trucioli continuavano ad essere altrettanto caldi come quelli prodotti al principio dell'operazione. Com'era possibile, si domandò Rumford, che il calorico contenuto nel blocco di ottone non finisse mai?

Dalla metà dell'ottocento si cominciò a mettere in dubbio la teoria del calorico e si affermò l'idea che la temperatura fosse legata al movimento delle molecole; quella che adesso si chiama pomposamente "teoria cinetica dei gas", alla quale diede grandi contributi il fisico scozzese J.C. Maxwell (1831 – 1879). Teniamo presente che questa teoria funziona molto bene con i gas, nei quali le molecole possono muoversi liberamente mentre per fluidi e per i solidi la faccenda diventa un po' più complicata.

Misura del potere calorifico dell'olio

Vogliamo ora misurare il potere calorifico dell'olio, ovvero la quantità di calore che è in grado di produrre la combustione di un grammo di olio. La misura che otterremo sarà molto imprecisa perché, come abbiamo visto, è molto difficile minimizzare il calore disperso nel riscaldamento dell'ambiente. Ci accontenteremo di fare una misura per difetto, ovvero ottenere un valore più piccolo di quello effettivo. Dopo aver pesato una piccola quantità di olio alimentare cercheremo di farla bruciare in un contenitore adiabatico (per esempio una tazzina da caffè): Sopra di esso metteremo un contenitore metallico, per esempio una formina di alluminio, di quelle che si usano per fare il cream caramel con dentro una piccola quantità di acqua precedentemente pesata. Misurando l'aumento di temperatura dell'acqua si ottiene il potere calorifico dell'olio dividendo il calore ceduto all'acqua $m_a c \Delta T$ per la massa dell'olio m_o . Come abbiamo già detto otterremo un valore inferiore a quello reale che vale circa 9 kcal/g. Questo valore è molto grande, nel sistema internazionale equivale a 38 MJ/kg, ovvero la combustione di 1 kg di olio è in grado di produrre un lavoro di 38 milioni di Joule corrispondenti al lavoro necessario per portare 13 tonnellate sulla torre Eiffel. Prima di capire perché questa misura è così interessante, risolviamo qualche problemino.

Prob. 7) Quale quantità di nutella (densità energetica = 5,3 kcal/g) fornirebbe l'energia occorrente a un uomo di 70 kg per salire sulla cima del monte Everest, alto 8800 m, dal livello del mare?

$$M_n = E/p = mgh/p = 70 \cdot g \cdot 8800 / (5,3 \cdot 4186) = 272 \text{ g}$$

Eccone altri un po' più complessi.

Prob. 8) Supponiamo che il Sole sia una sfera di carbone. Per quanto tempo potrebbe bruciare emettendo l'attuale potenza? (dati: raggio del Sole = $6,96 \cdot 10^8$ m; potenza emessa = $3,83 \cdot 10^{26}$ W; potere calorifero del carbone = 7500 Kcal/kg; densità del carbone: $1,9 \text{ g/cm}^3$)

$$t = E/P = \frac{d(4/3)\pi r^3 \rho}{P} = \frac{(1900 \cdot 4/3 \cdot \pi \cdot (6,96 \cdot 10^8)^3 \cdot 7500 \cdot 4186 / (3,83 \cdot 10^{26}))}{(365,25 \cdot 24 \cdot 3600)} = 6970 \text{ anni da cui deduciamo che il sole non è una sfera di carbone.}$$

Prob. 9) Produrre calore bruciando metano costa meno rispetto a produrlo con la corrente elettrica. In particolare, se per produrre una certa quantità di calore con una stufa elettrica spendiamo (mettiamo) 100 €, quanto spendiamo per produrre la stessa quantità bruciando metano? [dati: costo elettricità = 0,165 €/kWh; potere calorifico metano = 39,48 MJ/m³; costo metano = 0,512 €/m³] (nota: i prezzi non sono aggiornati) [R=28 €]

Torniamo ora al problema dell'olio. Abbiamo visto che il suo contenuto energetico è assai grande. Questo fatto spiega perché gli umani (e non solo) sono ghiotti di cibi contenenti grassi. L'esercizio appena svolto sulla nutella ci mostra come il problema può essere capovolto: supponiamo di aver ingurgitato in un momento di depressione, un intero vasetto di nutella e presi dal rimorso vogliamo smaltirlo facendo dello sport. Questa è un'attività che possiamo svolgere nel laboratorio di informatica. Cerchiamo su internet il dispendio energetico nei vari tipi di sport e mettiamolo in una tabella excel. Otterremo qualcosa del genere:

attività	Kcal/h
a sedere	84
in piedi	102
camminare lentamente in piano	156
marciare a 3.5 Km/h	192
marciare a 4.0 Km/h	210
marciare a 4.5 Km/h	228
balli lenti	258
golf	312
ciclismo amatoriale	354
tennis da tavolo	510
pallavolo	510
nuoto	546
tennis	546
corsa campestre	624
balli veloci	678
calcio	702
sci	720
pallamano	822
pallacanestro	858
pugilato	900
maratona competitiva	1200
sci competitivo	1290
nuoto competitivo	1500
ciclismo competitivo	1560

La cosa che salta subito all'occhio è che fare una passeggiata fa consumare appena il doppio che non fare assolutamente nulla; il nostro "motore" in effetti gira "al minimo" ad un regime piuttosto elevato (80 kcal/h pari a circa 2000 kcal al giorno, il cosiddetto metabolismo basale). Ciò è dovuto al fatto che siamo animali a sangue caldo e gran parte dell'energia che ingurgitiamo sotto forma di cibo ci è necessaria per mantenere la nostra temperatura corporea a 37 °C. Ecco un altro esercizio tipico per quantificare il problema:

Prob. 10) Quanto tempo bisogna passare in bicicletta per smaltire una crostatina all'albicocca? Leggiamo che ogni pezzo contiene: 2,2g di proteine, 25,7 di carboidrati e 6,0 di grassi. (nota: le proteine come i carboidrati apportano 4 kcal/g, i grassi ben 9 kcal/g; il consumo in bicicletta è 354 kcal/h)

Il tempo è L'energia/Potenza per cui $t = E/P = (2,2*4+25,7*4+6*9)/354*60 = 28 \text{ min}$

Riferimenti bibliografici

Giovanni Moreno – Gian Vittorio Pallottino, Manuale di Fisica, Le Monnier, 1982
 Vittorio Zonetti, Percorsi di fisica, Zanichelli, 1990