

4. Temperatura, calore, energia

4.1 Come separare i tre concetti di temperatura, calore, energia

➤ Iniziare dalla temperatura

- La temperatura è una grandezza di cui il ragazzo ha una percezione fisica fin dall'infanzia; inoltre, molto presto, capisce che la temperatura si misura con uno strumento chiamato termometro.
- La temperatura è una proprietà caratteristica del corpo (variabile di stato), dipende cioè dallo stato del sistema in un dato istante e non dalla storia precedente
- È “atipica” per diversi motivi:
 - varia in relazione alla temperatura dei corpi vicini (equilibrio termico),
 - può variare in presenza di interazioni (fenomeni di attrito, reazioni chimiche, assorbimento di radiazione),
 - ma soprattutto è una grandezza “statistica”, è legata cioè all'energia media dell'alto numero di particelle che costituiscono il sistema in condizioni di *equilibrio termodinamico* (non ha senso parlare di “temperatura” di una sola particella o di un numero piccolo di particelle)¹,
 - è atipica la modalità di misura e di determinazione dell'unità di misura (scale termometriche),
- È *utile ed economico* definire la grandezza fisica temperatura per descrivere in modo sintetico la situazione di equilibrio termico e la relazione fra lo stato di equilibrio termico e altre grandezze fisiche importanti
- Come viene definito l'*equilibrio termico*: è un *principio* (il cosiddetto “principio zero” della termodinamica), basato sull'evidenza sperimentale attraverso un ragionamento di “bootstrap” (si postula il principio dell'equilibrio termico per definire il funzionamento del termometro, ma si usa il termometro per definire il principio dell'equilibrio termico)
- La *misura* della temperatura:
 - il parametro termometrico (termometri a dilatazione, termoresistenze, termocoppie, senso del tatto (?), radiazione infrarossa),
 - come e in quanto tempo si raggiunge l'equilibrio fra il corpo e il termometro,

¹Nell'approccio microscopico, in condizioni di equilibrio termodinamico, la temperatura assoluta è direttamente proporzionale all'energia cinetica media del singolo costituente la materia (atomo, molecola: nei fluidi l'*energia cinetica* media della singola molecola è $3/2 k_B T$, con k_B = costante di Boltzmann).

In questo senso si può parlare di “temperatura” anche per un fascio di luce (o meglio di onde elettromagnetiche) se esso è stato emesso in condizioni di equilibrio termodinamico da una certa sorgente: ad esempio l'energia media dei fotoni solari corrispondenti alla temperatura media della superficie del sole di 6400 K è di circa $3 \cdot 10^{-19} \text{J}$ (1,5 eV), mentre con una temperatura di 300 K (temperatura ambiente sulla Terra) l'energia media dei fotoni è circa 20 volte più piccola.

Per la luce si definisce anche la “temperatura di colore”; per la legge di Wien, infatti, un “corpo nero”, cioè un corpo che emette e assorbe uniformemente a tutte le lunghezze d'onda, emette luce (o in generale onde elettromagnetiche) con un picco di intensità intorno a una lunghezza d'onda λ_{max} che è inversamente proporzionale alla temperatura assoluta T ($\lambda_{max} = C/T$, dove la costante $C \approx 3 \text{ mm} \cdot \text{K}$). A un corpo che emette con un picco di intensità luminosa intorno a una certa λ_{max} si assegna quindi una “temperatura di colore” calcolata con la legge di Wien, anche se l'emissione non è stata ottenuta con il solo riscaldamento, ma in altri modi (ad esempio, in certe lampade ad alta efficienza luminosa l'emissione viene ottenuta riscaldando dei gas opportuni).

- condizioni per un “buon termometro”: durante il raggiungimento dell’equilibrio termico non deve causare variazioni significative di temperatura del corpo da misurare (questo è il motivo principale per cui il nostro senso del tatto non può essere un buon termometro!)

➤ *Iniziare dal flusso di energia termica*

- È un *processo* di cui il ragazzo ha una percezione diretta attraverso gli innumerevoli scambi di energia fra due corpi a *temperatura diversa*, nei quali è chiaro che qualcosa fluisce dal corpo a temperatura più alta (T_1) a quello a temperatura più bassa (T_2) e che questa “cosa” non è materiale ma ha le proprietà dell’energia. Infatti
 - si *trasferisce* da un corpo all’altro,
 - è *immagazzinata* inizialmente nel corpo 1 e poi rimane immagazzinata nel corpo 2,
 - si *conserva*, perché l’energia che esce dal corpo 1 entra nel corpo 2;
 - inoltre il ragazzo sa che l’energia termica si può *trasformare* in altre forme di energia (ad esempio luminosa) e che si possono trasformare altre forme di energia (ad esempio energia elettrica) in energia termica e che, passando e trasformandosi, l’energia termica fa cose utili.
- Come giungere a *formalizzare* il passaggio di energia termica, cioè a definire formalmente la quantità di energia termica che fluisce dal corpo 1 al corpo 2. Occorre definire prima la procedura con cui si misura la temperatura e quindi il principio dell’equilibrio termico (vedi sopra). Il passo successivo è trovare la relazione fra la variazione di energia termica del corpo 1, dE_1 , e le altre grandezze che intervengono nel processo, che sono, oltre alle temperature iniziali e finali, la massa m_1 e il “calore specifico” c_1 del corpo 1:

$$dE_1 = c_1 m_1 (T_f - T_{i1}) \quad (1)$$

dove T_f è la temperatura finale di equilibrio fra i due corpi, raggiunta alla fine del passaggio di energia. Vale la relazione analoga per la variazione di energia termica del corpo 2 e si dimostra sperimentalmente che tanta energia esce dal corpo 1 ($dE_1 < 0$) altrettanta ne entra nel corpo 2 ($dE_2 > 0$):

$$dE_2 = c_2 m_2 (T_f - T_{i2}) = - dE_1 \quad (2)$$

- L’energia termica così definita è una *grandezza di stato*, non dipende cioè dal processo attraverso il quale il corpo ha raggiunto quello stato, ma è una caratteristica del corpo in una certa condizione di temperatura.
- È *diversa dalla temperatura*, perché dipende dalla massa del corpo e dal materiale di cui il corpo è fatto (calore specifico)
- In generale non interessa misurare il valore assoluto dell’energia termica ma solo *di quanto varia* (assumendo la conservazione dell’energia) al variare della temperatura.
- La relazione (1) è usata per definire l’*unità di misura dell’energia termica (caloria)*, prendendo come riferimento l’acqua: la caloria è la quantità di energia che fa aumentare di 1°C la temperatura di 1g di acqua (fra 14,5 °C e 15,5°C).
- *Equivalenza caloria-joule*: come sappiamo, esiste un’altra unità di misura dell’energia, il joule, definita attraverso il lavoro che compie la forza di 1N applicata per un tratto di 1 m. In un celebre esperimento Joule dimostrò, nel XX secolo, che
 - con una quantità di lavoro L si può ottenere, in un esperimento opportunamente controllato, una variazione di temperatura pari a quella che si otterrebbe con un passaggio di energia termica dE calcolata in base alla relazione (1);
 - da qui segue che “l’equivalente meccanico della caloria”, cioè il *fattore di conversione* da calorie a joule, 1 cal = 4,18 J;

- caloria e joule sono quindi due *unità di misura equivalenti*, perché misurano la stessa grandezza fisica.

➤ *La quantità di calore*, ovvero il modo più comune di far *cambiare la temperatura*

- Il concetto di “quantità di calore”, o, più brevemente, di “calore” non è strettamente necessario, anzi è fonte di numerose confusioni. Viene definito attraverso la relazione (1), chiamata la “legge fondamentale della calorimetria”, introducendo una nuova grandezza Q che vale:

$$Q = c m (T_f - T_i) \quad (3)$$

- È chiaro che Q **non** è una grandezza fisica diversa dalla variazione di energia termica dE , ma è il modo sintetico di chiamare tale variazione; la quantità di calore è positiva se $T_f > T_i$ (la quantità di calore “entra” nel corpo), è negativa se $T_f < T_i$ (la quantità di calore “esce” nel corpo).
- Difficoltà concettuali create dall’introduzione della quantità di calore come *grandezza fisica che ha un nome diverso* dalla variazione di energia termica:
 - si induce l’idea che la quantità di calore sia una “forma di energia” del tutto particolare, mentre **non** è una “forma di energia”, ma è uno dei modi per misurare quanta energia è entrata o uscita dal corpo;
 - la quantità di calore **non** è una caratteristica del corpo (proprietà essenziale dell’energia) ma è la caratteristica di un *processo*, misura cioè quanta energia entra o esce dal corpo in un processo di scambio di energia;
 - la quantità di calore **non** sta nel corpo (è errato dire “questa cosa contiene molto calore”): questa è la principale confusione su calore ed energia, perché si tende erroneamente a pensare che, essendo energia che entra o esce, la quantità di calore sia già nel corpo per poterne uscire o che rimanga nel corpo dopo che è entrata!
- Avendo ben chiare queste difficoltà e questi rischi, è tuttavia *utile ed economico* definire la grandezza *quantità di calore*
 - per descrivere in modo sintetico, attraverso la relazione (3), le variabili da cui dipende la variazione di temperatura in un processo termico, che può anche non essere un passaggio di energia termica fra due corpi diversi (ad esempio quando un corpo si riscalda perché assorbe energia radiante o perché avviene una “reazione chimica esotermica”);
 - perché è un termine usato spesso non solo nel linguaggio quotidiano ma anche in contesti scientifici, ad esempio nella descrizione di trasformazioni termodinamiche, chimiche, nucleari, ecc., per descrivere sinteticamente il *bilancio energetico*;
 - perché Q *complessivamente si conserva in molti fenomeni*: nel contatto termico fra due corpi si verifica che la temperatura di equilibrio finale è tale che il corpo 1 perde (o acquista) una quantità di calore $Q_1 = c_1 m_1 (T_f - T_{i1})$ uguale a quella acquistata (o perduta) dal corpo 2, $Q_1 = -Q_2$;
 - perché è comodo utilizzare un simbolo per indicare sinteticamente la quantità di energia che entra in un corpo durante una trasformazione termodinamica in un modo diverso dal lavoro, che è uno spostamento ordinato sotto l’azione di una forza (vedi più avanti il “primo principio della termodinamica”);
 - perché il modo più semplice di far variare la temperatura di un corpo è attraverso il contatto con un altro corpo a temperatura diversa ed è comodo descriverlo come un passaggio di “quantità di calore”;
 - si può però trasferire una quantità di calore senza cambiare la temperatura (cambiamenti di stato);

- si può cambiare la temperatura senza che ci sia un trasferimento di quantità di calore (ad es. in una reazione chimica come la combustione, nell'irraggiamento, in presenza di attrito, nelle reazioni nucleari); anche in questi casi si utilizza comunque la relazione (3) per misurare quanta energia è stata trasformata in energia termica durante il processo.
- *Equivalenza calore – lavoro*: il significato dell'esperimento di Joule. L'esperimento **non** dimostra che $L=Q$, come si trova scritto in certi testi, ma dimostra che
 - con una quantità di lavoro L si può ottenere, in un esperimento opportunamente controllato, una variazione di temperatura pari a quella che si otterrebbe con una quantità di calore Q calcolata in base alla legge (1);
 - da qui segue "l'equivalente meccanico della caloria", cioè il *fattore di conversione* da calorie a joule, $1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$;
- Concetto di *energia interna*: è l'energia che "sta dentro" il corpo. Ci sono diverse forme di energia interna: energia legata alla temperatura (*energia termica*), composizione chimica (*energia chimica*), stato fisico (*energia di legame*), struttura nucleare (*energia nucleare*), ecc.
- *Primo principio della termodinamica*: esprime la conservazione generale dell'energia indipendentemente dai processi che avvengono in un corpo. Poiché ci sono due modi di far variare l'energia interna di un corpo (attraverso un lavoro L oppure scambiando una quantità di calore Q), la variazione di energia interna U vale:

$$dU = Q + L \quad (4)$$

Nella relazione, sia Q che L possono essere positivi o negativi e il risultato sarà che la variazione di energia interna U potrà essere positiva o negativa, cioè l'energia interna potrà crescere o diminuire. In generale non interessa conoscere quanta energia interna ha un corpo o un sistema, ma di quanto essa varia durante la trasformazione.

- Concetto di *potenza*: in molti fenomeni la grandezza rilevante è la quantità di energia trasferita in un dato tempo, cioè la potenza, che è appunto la *quantità di energia trasferita o trasformata nell'unità di tempo*. Nella fiamma che brucia in un fornello di gas, ciò che importa è quanto rapidamente può scaldare, cioè qual è la potenza della fiamma: un piccolo bruciatore fornisce tipicamente potenze di un centinaio di watt (va bene per "fare il caffè"), mentre un bruciatore grosso può arrivare a 1 kW. Così pure in un boiler elettrico o in un ferro da stiro le potenze sono dell'ordine del chilowatt. In questi casi si fa piuttosto il calcolo inverso: nota la potenza del dispositivo, si calcola quanta energia "consuma" (in realtà trasforma) per un dato intervallo di tempo di uso (infatti i consumi dell'energia elettrica si misurano spesso in "chilowattore", kWh, anziché in joule o in calorie)

4.2 L'irreversibilità e il secondo principio della termodinamica

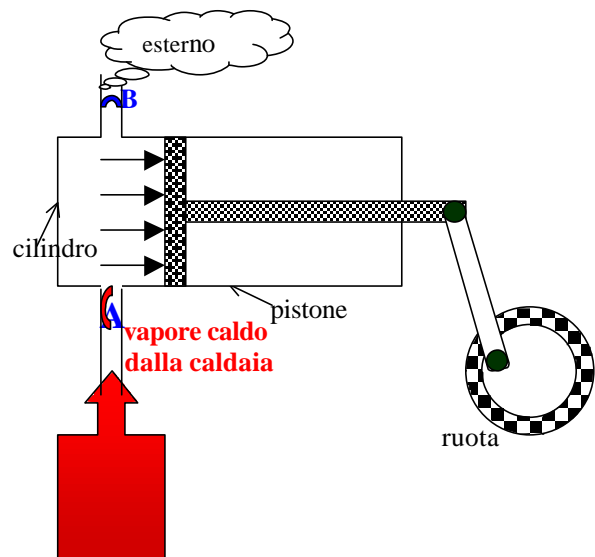
Molti fenomeni termici sono chiaramente "irreversibili", cioè avvengono in una sola direzione, a differenza di un fenomeno meccanico che, in assenza di attriti, può avvenire in modo identico in entrambi i sensi. Ad esempio, un corpo caldo a contatto con uno freddo spontaneamente si raffredda, mentre quello freddo si scalda e non avviene mai l'inverso; se voglio che un corpo freddo si raffreddi ulteriormente e quello caldo si scaldi, occorre fare lavoro: è ciò che avviene, ad esempio, in un frigorifero.

Non basta quindi pensare al flusso di energia per descrivere un processo termico, occorre anche introdurre il flusso di un'altra "grandezza di stato", diversa dall'energia interna, ma con proprietà simili: deve essere una grandezza che

- sta dentro il corpo,
- esprime una proprietà del corpo in una certa condizione, indipendentemente da come il corpo è giunto a questa situazione,
- varia in positivo o in negativo durante una trasformazione,
- la sua variazione determina l'irreversibilità del processo (mentre la sola variazione dell'energia interna non lo determina).

Questa grandezza è l'entropia.

Uno dei primi a intuire che c'è un'altra grandezza che fluisce in un processo termico, oltre all'energia, fu Carnot nel XIX secolo, nel suo studio del funzionamento di una macchina termica. I vapori caldi, che escono dalla caldaia attraverso la valvola A, portano nel cilindro una quantità di calore Q_1 di alta temperatura T_1 , che serve a produrre il lavoro L che spinge il pistone, tuttavia una parte dell'energia rimane nei gas che si sono raffreddati ed escono nell'ambiente. In dettaglio, il pistone torna indietro spinto dall'inerzia della ruota, che è stata messa in moto proprio dal pistone stesso; tornando indietro, il pistone spinge fuori attraverso la valvola B i gas che portano una quantità di calore Q_2 di temperatura più bassa, T_2 .



Alla fine del ciclo, il cilindro è tornato nella situazione iniziale, l'energia interna U non è cambiata, mentre la quantità di calore Q_1 è servita a produrre il lavoro L e a riversare la quantità di calore Q_2 nell'ambiente. Dal primo principio troviamo:

$$Q_1 = L + Q_2$$

Il ciclo serve quindi a trasformare una parte di Q_1 in lavoro utile L , perdendone però una buona parte, Q_2 , in forma non utilizzabile. Ciò che Carnot scoprì fu che, se vogliamo perdere la minima quantità di calore Q_2 , occorre che le quantità di calore stiano fra di loro in modo proporzionale alle temperature assolute dei rispettivi corpi:

$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2} \quad (5)$$

Se ciò avviene, oltre ad avere il massimo lavoro ottenibile, date le temperature dei due corpi, abbiamo anche che il ciclo è *reversibile*: esso può cioè essere compiuto al contrario, usando il lavoro L per togliere energia al corpo 2 e versarla nel corpo 1 (macchina frigorifero).

L'entropia S_1 che esce dal corpo 1 è appunto data da Q_1/T_1 , mentre quella che entra nel corpo 2 vale Q_2/T_2 ; in generale:

$$S = \frac{Q}{T} \quad (6)$$

In un processo reversibile l'entropia si conserva, *in un processo irreversibile l'entropia aumenta*. Ad esempio, nel passaggio di calore da un corpo caldo a uno freddo, $Q_1 = Q_2$, però, essendo $T_1 > T_2$, l'entropia del corpo 2 cresce di più di quanto diminuisca l'entropia del corpo 1 e quindi l'entropia complessiva aumenta.

Poiché, complessivamente, nell'universo avvengono continuamente processi irreversibili, l'entropia complessiva dell'universo aumenta continuamente.

4.3 Conduzione e convezione termica

- sono argomenti laterali, ma importanti perché legati ai processi di trasferimento di energia e al raggiungimento dell'equilibrio termico;
- la *conduzione termica* avviene per contatto; a livello microscopico è dovuta a due meccanismi:
 - nei fluidi e nei gas, in cui le molecole sono libere di muoversi, oppure come nei metalli in cui ci sono elettroni mobili che possono spostarsi e urtare contro gli atomi del reticolo solido, la conduzione è affidata agli “urti”;
 - nei solidi la conduzione avviene anche attraverso le vibrazioni intorno alle posizioni di equilibrio degli atomi, che si trasmettono da un atomo all'altro tramite l'accoppiamento che esiste a causa del legame dello stato solido;
 - la conduzione termica, cioè la quantità di calore trasferita nell'unità di tempo (Q/Dt), è *direttamente proporzionale* alla differenza di temperatura DT e all'area di contatto S , mentre è *inversamente proporzionale* allo spessore Dx di materiale (il coefficiente di proporzionalità è tipico del materiale ed è chiamato coefficiente di “conducibilità termica”);
- nei fluidi, insieme alla conduzione, avviene un fenomeno di *convezione*, dovuta al fatto che il fluido in vicinanza di una zona calda (ad esempio una zona in cui avviene una combustione) si dilata e, per la spinta di Archimede, tende a salire verso l'alto; si forma quindi un moto ordinato verso l'alto sopra la zona calda a cui segue un moto di richiamo di fluido freddo dalle zone vicine (correnti convettive).

4.4 Energia radiante, irraggiamento, equilibrio radiazione-materia

L'energia radiante (elettromagnetica, luminosa, infrarossa, ecc.)

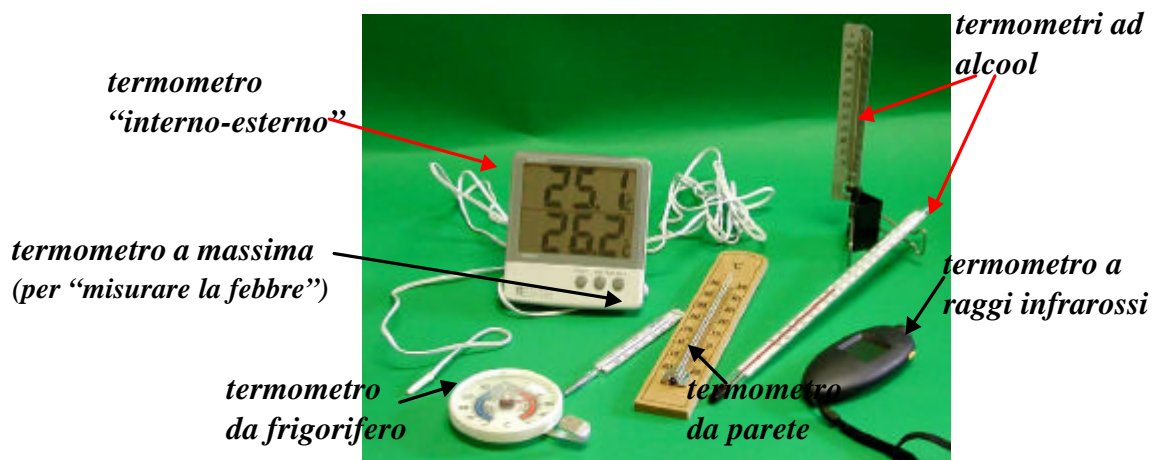
- *viaggia* anche nello spazio vuoto (direzionalità, velocità di propagazione),
- viene emessa dalla sorgente con una intensità (potenza²) che dipende dalla temperatura (legge di Stephan-Boltzmann, $W_{rad} \propto S T^4$);
- anche il colore (la distribuzione spettrale) della radiazione dipende dalla temperatura: lo spettro di corpo nero si ottiene se c'è equilibrio fra la radiazione emessa ed assorbita e la materia (*temperatura di colore*),
- la radiazione mantiene l'informazione della temperatura del corpo che l'ha emessa anche viaggiando nello spazio (così viene misurata la temperatura sulla superficie delle stelle e può essere misurata la temperatura di un corpo lontano),
- ciò che si trasmette per irraggiamento **non** è calore (come detto erroneamente in molti testi, che enunciano che il calore si trasmette per “conduzione, convezione e irraggiamento”), ma energia radiante; si può ottenere calore, o meglio una certa quantità di calore, quando l'energia radiante viene *assorbita* dalla materia, cioè interagisce con essa;
- l'assorbimento di energia radiante ha caratteristiche completamente diverse dall'assorbimento di calore; ad esempio:
 - > parte della radiazione può essere *riflessa* o *trasmessa*,
 - > l'assorbimento dipende dalla superficie del corpo (un oggetto bianco assorbe di meno dello stesso oggetto dipinto di nero),

² L'intensità di un fascio di luce emesso da una sorgente si misura infatti in unità (lumen) che sono equivalenti a quelle di una potenza. Una luce molto intensa indica infatti che la sorgente emette molta energia in un secondo; l'energia totale che emetterà dipende dal tempo totale per cui resta accesa. Altro esempio: quando si acquista una lampadina, si indica la *potenza*, cioè l'energia che la lampadina, collegata a una determinata sorgente di tensione elettrica, è in grado di erogare nell'unità di tempo (una lampadina da 100 W, sarà più luminosa di una da 30 W).

- > l'energia può trasformarsi in altre forme di energia diverse da quella termica (es. in energia chimica per fotosintesi, energia elettrica per effetto fotovoltaico)

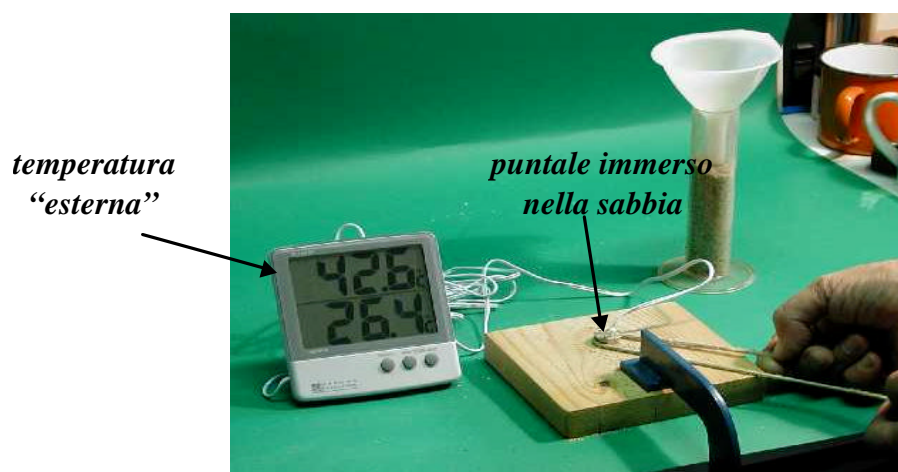
4.5 Oggetti e semplici esperimenti "per pensare"

- una raccolta di diversi termometri per iniziare a discutere di temperatura, equilibrio termico, misura della temperatura, ecc.;
- particolarmente utile è il *termometro a raggi infrarossi* per iniziare a discutere di energia radiante e delle sue caratteristiche, completamente diverse da quelle degli altri termometri:
 - > fa una misura *a distanza* e non per contatto,
 - > è *direzionale*, perché raccoglie raggi che provengono da una ben determinata sorgente e viaggiano in una determinata direzione;



Suggerimenti per semplici misure sull'energia interna:

- i barattoli semipieni di sabbia per l'energia interna;
- una misura del "potere calorifico" di una fiamma o di un combustibile per l'energia chimica;
- una misura di conduzione del calore;
- una misura di assorbimento e di emissione di *energia radiante* (ad esempio usando barattoli chiari e scuri esposti al sole o alla luce di una lampada);
- un "esperimento alla Joule", per l'equivalente meccanico della caloria



4.6 Esercizi

1. Discutete un fenomeno in cui siano chiare le caratteristiche dell'energia interna, in particolare dell'energia interna termica (ad es. trasferimento, trasformazione, immagazzinamento, conservazione, degradazione, costi);

- descrivete l'energia in gioco, con quali meccanismi viene trasferita o trasformata;
- discutete la potenza collegata al trasferimento o alla trasformazione;
- discutete come si potrebbero misurare energia e potenza;
- discutete le relazioni che le legano ad altre grandezze;
- applicate tali relazioni all'analisi di qualche altra "situazione problematica".

2) Realizzate un esperimento in cui variate l'*energia interna* di un corpo, in una delle sue diverse forme; in base alle osservazioni/misure che farete determinate la variazione di temperatura, la variazione di energia e la potenza erogata. Riportate in dettaglio i dati misurati, possibilmente organizzati in forma di tabella o di grafico.