

A. Parte generale

1. Introduzione

Lo scopo per lo sviluppo di questo corso era una modernizzazione e una razionalizzazione dell'insegnamento della fisica. Per raggiungere questo scopo le varie aree della fisica sono state rappresentate da un punto di vista unitario. Da un lato questo procedimento presenta dei vantaggi nell'economia dell'insegnamento. Nelle principali aree della fisica appaiono le stesse regole e le stesse strutture: nella meccanica, nell'elettrologia e nella termologia, ma in misura minore anche nell'ottica, nell'acustica e nell'elettronica. Di conseguenza queste relazioni dalla validità generale devono essere imparate una volta sola. D'altro canto, già il fatto di percepire che queste strutture esistono, è un obiettivo didattico appagante per un insegnamento che abbia l'ambizione di trasmettere cultura generale.

Un ruolo particolarmente importante in questo lavoro di uniformazione è quello ricoperto da una classe particolare di grandezze fisiche: le grandezze estensive.

Una razionalizzazione e semplificazione dell'insegnamento si ottiene anche prestando maggiore attenzione agli sviluppi della fisica moderna. Il XX° secolo non ha solamente arricchito la fisica con teorie nuove e sempre più complesse, ci ha anche mostrato che gli ambiti classici della fisica, cioè la fisica non relativistica e non quantomeccanica, sono più semplici di quello che sembrava. Facciamo alcuni esempi per spiegarlo meglio.

In generale, oggi la meccanica si insegna sostanzialmente nella forma che le diede Newton, cioè come una teoria di azione a distanza. Si dice, per esempio, che un corpo A esercita una forza su un corpo B senza menzionare il ruolo del mezzo che si trova tra A e B (ad esempio una molla o un campo) nella trasmissione di questa forza. Anche nell'elettromagnetismo parliamo ancora come se le interazioni elettriche e magnetiche fossero delle interazioni a distanza. Invece, almeno da Maxwell in poi, si è dell'opinione che le forze siano meglio descritte come fenomeni locali, o di interazione a contatto. Questa concezione non semplifica solo la teoria, è anche concettualmente più facile.

Un altro esempio del fatto che una maggiore considerazione degli sviluppi recenti porta a una semplificazione dell'insegnamento, riguarda il concetto di campo. Ai tempi di Faraday e Maxwell, quando la fisica conosceva ancora l'etere, il campo era un concetto facile da capire: era un particolare stato dell'etere. Dopo l'eliminazione dell'etere il campo divenne un concetto astratto e di difficile comprensione ed è ancora così che viene insegnato al giorno d'oggi. In realtà la moderna teoria dei campi è quasi sul punto di farsi dei campi un'idea ancora più chiara di quella dei tempi di Maxwell: i campi sono strutture, sistemi fisici, che rivendicano un grado di realtà equivalente a quello di altri sistemi, anche materiali. La fisica moderna è quindi vicina all'aver dei campi una rappresentazione concettuale molto concreta.

Come terzo esempio del fatto che la fisica moderna conduce a una rappresentazione semplificata della fisica classica, si noti che esiste tutta una serie di concetti difficili, la cui esistenza era a quel tempo in una certa misura giustificabile, che nel frattempo sono diventati superflui. Tra questi il concetto di forme di energia e in particolare quelli di calore e lavoro.

Un'altra caratteristica del presente metodo d'insegnamento è quella di creare dei punti di collegamento con altre materie. Un esempio lampante è dato dalla termodinamica, dove la coppia di grandezze quantità di materia/potenziale chimico è introdotta in connessione con l'altra coppia entropia/temperatura. Si riesce così a mostrare che le reazioni chimiche possono essere trattate con gli stessi mezzi concettuali dei processi meccanici, elettrici e termici.

Negli ultimi anni l'insegnamento della fisica si è arricchito di tutta una serie di nuovi termini, legati soprattutto ai rapidi sviluppi nelle tecniche di informazione e comunicazione. Nel farlo si è spesso misconosciuto che questi argomenti riguardano molto di più che una nuova classe di apparecchi elettronici. La fisica del trasporto e dell'elaborazione dei dati merita un approccio da un punto di vista più vasto di quello strettamente tecnico. Il suo inserimento in modo naturale nel qui presente corso, è reso possibile dall'introduzione di una grandezza che nell'insegnamento tradizionale non appare: la misura di Shannon per la quantità di dati.

2. Fondamenti fisici

2.1 Grandezze estensive

Esiste una classe di grandezze fisiche delle quali è particolarmente facile farsi una rappresentazione concettuale. Le chiamiamo *grandezze estensive* (Falk, 1977, Falk 1979, Schmid 1984). Ne fanno parte la massa, l'energia, la carica elettrica, la quantità di materia, la quantità di moto, la quantità di moto angolare, l'entropia e altre ancora. Ognuna di queste grandezze può essere immaginata come una specie di sostanza, o un fluido. Con "immaginata" si intende che, dal punto di vista fisico, è corretto parlarne come si parla di una sostanza. Si può usare lo stesso vocabolario che si usa nel linguaggio comune per esprimere il bilancio delle sostanze.

Una caratteristica che permette di dire se una grandezza X è estensiva, è il suo comparire in un'equazione di bilancio:

$$dX/dt = I_X + \Sigma_X$$

Questa equazione fa un'asserzione relativa a una particolare regione dello spazio. In Fig. 2.1 dX/dt descrive la variazione nel tempo del valore di X all'interno della regione considerata. Anche Σ_X si riferisce all'interno della regione. Questo termine indica quanto della grandezza X viene prodotto rispettivamente annientato, per unità di tempo. I_X per contro, è una grandezza il cui valore si riferisce alla *superficie* della regione dello spazio.

Possiamo dare un'interpretazione più chiara dell'equazione di bilancio, interpretando I_X come l'intensità di una corrente attraverso la superficie della regione in questione (Herrmann 1986). Le variazioni del valore di X hanno quindi due cause: da un lato la produzione rispettivamente annientamento di X all'interno dell'area e dall'altro una corrente attraverso la superficie.

Per alcune grandezze estensive, il termine Σ_X è sempre nullo. Queste grandezze possono variare il loro valore all'interno di una regione dello spazio solo se una corrente fluisce attraverso la superficie. Sono dette *grandezze conservate*. La carica elettrica

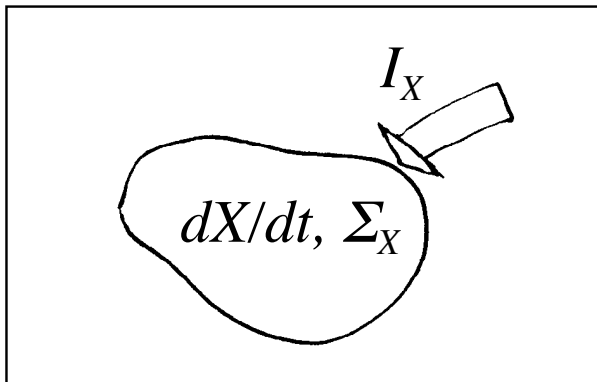


Fig. 2.1 Il valore della grandezza X all'interno del volume delimitato può cambiare grazie a correnti di afflusso rispettivamente deflusso o con produzione rispettivamente annientamento

e l'energia sono grandezze conservate. L'equazione di bilancio per la carica elettrica ha la seguente forma

$$dQ/dt = I$$

dove I è l'intensità di corrente elettrica. Analogamente, per l'energia vale

$$dE/dt = P$$

dove P è l'intensità di corrente d'energia o potenza.

Quindi una grandezza estensiva non deve per forza essere conservata. L'idea di grandezza estensiva è più vasta dell'idea di grandezza conservata. È comunque importante rendersi conto che solo per le grandezze estensive ha senso porre la questione della conservazione. Solo di una grandezza estensiva possiamo dire che è conservata o che non lo è. Per grandezze di altro tipo, come l'intensità del campo elettrico o la temperatura, l'idea di conservazione non ha senso.

Una grandezza estensiva non deve neanche essere necessariamente scalare. Quantità di moto e quantità di moto angolare sono esempi di grandezze estensive vettoriali. Possiamo pensare a una grandezza estensiva vettoriale come a tre grandezze estensive scalari, una per ogni componente del vettore e ognuna con la relativa equazione di bilancio.

L'esigenza per ogni grandezza estensiva di soddisfare un'equazione di bilancio, implica alcune semplici proprietà di queste grandezze:

- Il valore di una grandezza estensiva è riferito a una regione dello spazio.
- A ogni grandezza estensiva è associata un'altra grandezza che possiamo interpretare come intensità di corrente.
- Le grandezze estensive sono additive: se in un sistema A il valore della grandezza X è X_A e nel sistema B X_B , nel sistema composto da A e B la grandezza X avrà valore $X_A + X_B$, Fig. 2.2.
- Le intensità di corrente sono additive: se in una regione fluiscono due correnti dalle intensità rispettive I_{X1} e I_{X2} , allora nella regione fluirà in totale una corrente di intensità $I_{X1} + I_{X2}$.

Queste quattro proprietà descrivono quelle caratteristiche delle grandezze estensive che ne rendono così facile l'uso. Sono la giustificazione del fatto che le grandezze estensive possono essere immaginate come una sostanza. La decisione di pensare a una grandezza X come a una sostanza viene peraltro presa implicitamente, appena il termine I_X nell'equazione di bilancio viene denominato intensità di corrente.

Il fatto di poter parlare di determinate grandezze come si parla di sostanze come l'acqua o l'aria, assume un particolare valore nell'insegnamento.

Quando si conosce una nuova grandezza fisica, solitamente ci si deve adattare al suo contesto verbale: verbi, aggettivi e preposizioni specifiche.

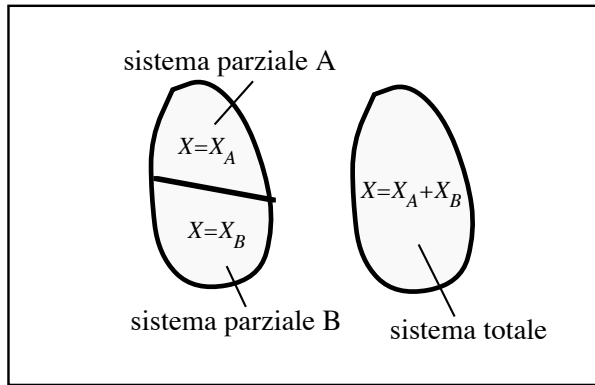


Fig. 2.2. Sull'additività delle grandezze estensive.

Ad esempio nella formulazione di frasi che contengono le grandezze forza, lavoro e tensione, lo spazio di manovra è abbastanza ridotto. Una forza *agisce* o viene *esercitata* su un corpo, il lavoro viene *compiuto*, una tensione *c'è* o *è applicata*.

Per contro, trattando le grandezze estensive ci si può servire di tutti i modi di dire comunemente usati nel riferirsi a sostanze. Così si potrà dire: "un corpo contiene una certa quantità di moto", ma anche "il corpo ha quantità di moto" oppure "c'è una certa quantità di moto nel corpo". Si possono pure utilizzare gli aggettivi *molto* e *poco*: un sistema può avere molta o poca energia (ma non molta o poca temperatura). Si può anche dire che un sistema *non* ha carica o *non* ha quantità di moto per dire che il valore della carica rispettivamente della quantità di moto è uguale a zero. (Per contro non si dovrebbe dire che un sistema non ha potenziale o non ha temperatura). Anche il fluire di una corrente di una grandezza estensiva si può descrivere con termini del linguaggio comune. Si potrà quindi dire che una corrente *fluisce* o *scorre* da A verso B, ma anche che *va* da A a B oppure che *parte* da A e *arriva* in B.

Ogni studente ha dimestichezza con questo linguaggio prima ancora di affrontare per la prima volta un corso di fisica. Mettere in evidenza le caratteristiche di sostanza di queste grandezze è dunque di grande aiuto anche nell'insegnamento.

Nell'insegnamento tradizionale questi vantaggi non sono sempre sfruttati. Solo la massa e la carica elettrica vengono presentate in modo da venire percepite come grandezze estensive. Al contrario energia e quantità di moto vengono solitamente derivate da altre grandezze così che le loro proprietà di grandezza estensiva non appaiono più come evidenti.

Che l'energia di solito non sia immaginata come una sostanza, appare chiaramente dalle seguenti frasi che si usano per descrivere la situazione rappresentata in Fig. 2.3: "Alla piastra destra del condensatore viene fornito lavoro. Così facendo aumenta l'energia potenziale della piastra destra nel campo della piastra sinistra". Lo stesso processo può essere de-

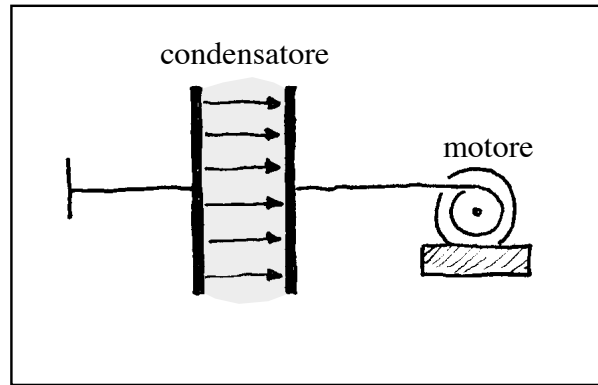


Fig. 2.3. Attraverso la corda e la piastra destra del condensatore, fluisce energia nel campo del condensatore

scritto anche tenendo conto delle caratteristiche di sostanza dell'energia: "nel condensatore fluisce energia attraverso la corda e la piastra destra."

Lo stesso discorso vale anche per la quantità di moto (la *quantitas motus*) come mostra l'esempio raffigurato in Fig. 2.4: "attraverso la corda, sul vagone viene esercitata una forza; in questo modo la quantità di moto del vagone cambia." Riconoscendo le proprietà di grandezza estensiva della quantità di moto, lo stesso processo può essere descritto così: "attraverso la corda, della quantità di moto fluisce nel carrello."

Questi esempi mostrano come la possibilità di crearsi un'immagine semplice di certe grandezze non venga sfruttata. In questo senso l'insegnamento tradizionale ha anche un altro difetto. Ci sono aree della fisica dove le grandezze estensive non vengono nemmeno introdotte: l'ottica e l'acustica o, per dirla in termini moderni, le aree della fisica relative alla tecnica dei dati. La grandezza estensiva adatta alla formulazione di equazioni di bilancio in queste discipline è la misura di Shannon per la quantità di dati. Nell'insegnamento dell'ottica e dell'acustica questa grandezza non ha ancora trovato molto spazio, anche perché i cambiamenti di fondo, in discipline con una così lunga tradizione, sono molto difficili.

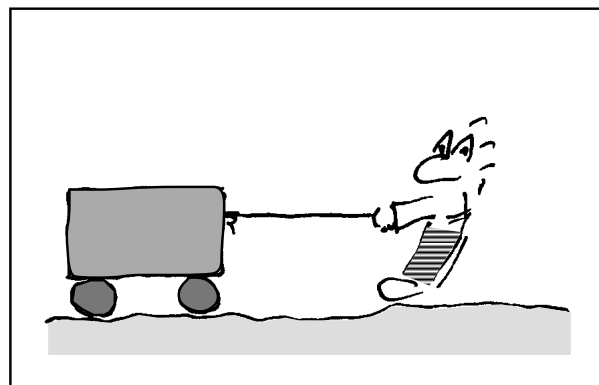


Fig. 2.4. Attraverso la corda fluisce quantità di moto nel carrello.

2.2 Forme di energia e portatori di energia

Il nome della grandezza fisica energia è spesso corredato di aggettivi. Si parla di energia cinetica, potenziale, elettrica, chimica, libera, nucleare, termica e radiante. Questa suddivisione in varie *forme di energia* non si fonda su un vero principio ma è la conseguenza di diversi punti di vista. Alcuni degli attributi definiscono il sistema o l'oggetto che contiene l'energia. Così l'energia radiante non è altro che l'energia (totale) della radiazione raccolta da un occhio, proprio come la carica elettronica è la carica dell'elettrone e con massa solare si intende la massa del Sole. Nella maggior parte dei casi però la suddivisione dell'energia in varie forme ha un proposito di maggiore portata.

La necessità di suddividere l'energia in forme si manifestò già nella metà del XIX° secolo, immediatamente dopo l'enunciazione del concetto di energia. Si giunse alla conclusione che doveva esistere una nuova grandezza fisica, anche se non se ne conoscevano le caratteristiche principali e nemmeno un metodo per misurarne il valore. L'energia si manifestava in vari sistemi e processi ma in modi molto diversi. Che in tutti questi casi si avesse a che fare con la stessa grandezza venne dedotto dall'osservazione che, nei processi, certe combinazioni di altre grandezze fisiche variavano secondo particolari proporzioni. C'erano per così dire tassi di cambio fissi tra queste combinazioni, i cosiddetti equivalenti. Il più conosciuto di questi tassi di cambio era l'*equivalente meccanico del calore*.

Fu una grande realizzazione scientifica riconoscere in queste combinazioni di grandezze fisiche le manifestazioni di un'unica, nuova grandezza. Fu chiamata energia. Da una parte la nuova grandezza aveva la bella proprietà di essere di natura universale. Giocava un ruolo nei più svariati ambiti della fisica creando delle connessioni tra questi ambiti. D'altra parte aveva un difetto: non si manifestava sempre allo stesso modo, come ci si attende da una grandezza fisica normale. Per questo motivo alcuni fisici la consideravano un'utile grandezza matematica e nulla più. In ogni caso sembrò sensato denominare le varie combinazioni di grandezze, che rappresentavano le varie spoglie sotto le quali l'energia si manifestava, forme di energia. L'energia non si presentava in un unico modo ma sempre in una delle sue *forme*. Non possedeva una caratteristica sempre identificabile, il cui valore si potesse determinare in ogni situazione.

Questa interpretazione sopravvisse grosso modo fino alla fine del secolo e, con le conoscenze del tempo, era sicuramente ragionevole. Mostreremo più avanti che, alla luce della fisica del XX° secolo, il concetto di forma di energia diventa superfluo, esattamente come lo sarebbero quelli di forma di entropia o forma di quantità di moto. Ma visto che questo concetto di forma di energia è sopravvissuto fino ai nostri giorni e negli ultimi anni l'insegnamento scolastico lo ha rivalutato, vogliamo ancora

aggiungere alcune osservazioni sulle basi fisiche della suddivisione dell'energia in forme.

Nella suddivisione dell'energia in forme si devono distinguere due procedimenti: l'uno permette di associare una forma all'energia immagazzinata, cioè contenuta in un sistema; l'altro classifica variazioni e flussi di energia. Il primo procedimento conduce a classi come l'energia cinetica, l'energia potenziale, l'energia interna, l'energia elastica (di una molla) ecc. Il secondo porta alle categorie energia elettrica, energia chimica, calore, lavoro, ecc.

Per distinguere le forme di energia a seconda del procedimento usato per definirle, le prime sono dette forme di esistenza o di immagazzinamento, le seconde forme di scambio. Vogliamo illustrare i due procedimenti, cominciando dalle forme di esistenza.

L'energia E di un sistema può sempre essere espressa in funzioni di altre variabili x_1, x_2, x_3 , ecc. Scegliendo in modo appropriato le variabili (Falk 1968, pag. 54), il sistema viene descritto interamente dalla funzione

$$E = E(x_1, x_2, \dots).$$

Questa funzione è detta funzione di Hamilton (nei sistemi meccanici) o potenziale termodinamico (nei sistemi termodinamici). In tutta una serie di sistemi a noi familiari, la funzione si scompone in una somma di termini, ognuno dei quali dipende da variabili che negli altri termini della somma non compaiono (Falk, Ruppel 1976). Ad esempio potrebbe succedere che

$$E(x_1, x_2, x_3) = E'(x_1, x_2) + E''(x_3).$$

Si dice in questo caso che il sistema si scompone in sottosistemi non interagenti.

Ogni qualvolta una scomposizione del genere è possibile, ai vari sommandi possono essere dati dei nomi. In questo modo si ottengono le forme di esistenza di energia. Un esempio concreto è un condensatore in movimento la cui energia totale è data da:

$$E(Q, p) = E_0 + Q^2/2C + p^2/2m.$$

Q è la carica elettrica, C la capacità, p la quantità di moto e m la massa del condensatore. Il primo sommando viene chiamato energia a riposo, il secondo energia del campo elettrico e il terzo energia cinetica.

Constatiamo dunque che le forme di esistenza definiscono semplicemente l'energia contenuta in un sottosistema. Quando è possibile ciò dovrebbe essere sottolineato. La denominazione risulta particolarmente facile se il sottosistema ha già un nome, come per l'energia del campo elettrico nel caso del condensatore. Si parla quindi di *energia del campo elettrico* o dell'*energia nel campo elettrico*.

Veniamo alla definizione delle forme di scambio. L'esperienza ci insegna che in ogni trasformazione

di un sistema da uno stato ad un altro, almeno due grandezze cambiano il loro valore. Ciò è conseguenza della validità della cosiddetta forma fondamentale dell'energia secondo Gibbs (Falk, Ruppel 1976):

$$dE = TdS + \varphi dQ + \mathbf{v}d\mathbf{p} + \mu dn + \dots \quad (2.1)$$

dove T è la temperatura, S l'entropia, φ il potenziale elettrico, Q la carica elettrica, \mathbf{v} la velocità, \mathbf{p} la quantità di moto, μ il potenziale chimico e n la quantità di materia.

La relazione dice tra le altre cose, che ogni variazione d'energia comporta la variazione di almeno un'altra grandezza *estensiva* ($S, Q, \mathbf{p}, n, \dots$). La maggior parte delle grandezze estensive soddisfa i criteri precedenti. In che misura la variazione di una grandezza estensiva influenza la variazione d'energia dipende dalla grandezza *intensiva* corrispondente ($T, \varphi, \mathbf{v}, \mu, \dots$). La grandezza estensiva e quella intensiva che appaiono nello stesso termine della forma fondamentale di Gibbs sono dette *coniugate* o più precisamente: coniugate per l'energia. Ad esempio T e S sono grandezze coniugate così come μ e n , ecc.

Per ogni processo si può scrivere una forma fondamentale. Nei casi più semplici è formata da pochi termini. Quelli diversi da zero al variare dell'energia, permetteranno di parlare di variazione d'energia dell'una o dell'altra forma. Se il termine TdS è diverso da zero diciamo che l'energia varia sotto forma di calore. Il termine φdQ corrisponde all'energia elettrica, il termine $\mathbf{v}d\mathbf{p}$ al lavoro e il termine μdn all'energia chimica.

Adesso possiamo immaginarci ogni variazione di energia della forma $y dX$ come una corrente della grandezza X dal sistema verso l'esterno o viceversa. Ne consegue che anche ogni *corrente* di energia può essere scritta come somma:

$$P = TI_S + \varphi I + \mathbf{v}F + \mu I_n + \dots \quad (2.2)$$

L'equazione ci dice che le correnti di energia possono essere suddivise in forme come le variazioni di energia. L'energia fluirà dunque come calore o lavoro, in forma chimica o elettrica, ecc.

L'equazione (2.2) evidenzia un fatto importante ma purtroppo spesso trascurato: quando fluisce energia fluisce sempre almeno un'altra grandezza (estensiva). In parole povere si può dire: "l'energia non fluisce mai sola".

Per quanto sia comprensibile che con le conoscenze del XIX° secolo i singoli termini delle equazioni (2.1) e (2.2) fossero considerati forme di energia e gli apparecchi, che assorbono energia in una forma e la restituiscono in un'altra, dei trasformatori di energia e per quanto infelice possa apparire da un punto di vista moderno, questa concezione non fa che evidenziare il fatto che le varie forme di energia sono grandezze fisiche diverse con la singolare proprietà di poter essere trasformate l'una nell'altra.

Da quando conosciamo la teoria della relatività ristretta, sappiamo che l'energia è una grandezza fisica indipendente e non una grandezza di calcolo "derivata". Parlare di forme di energia appare di conseguenza, da un punto di vista moderno, altrettanto ingiustificato del parlare di varie forme di carica elettrica a seconda che la carica sia portata da elettroni, protoni o muoni (Falk, Herrmann, Schmid 1984). La teoria della relatività ci dice che caratteristiche ha l'energia. Dall'equivalenza massa-energia segue che l'energia ha le stesse proprietà della massa: peso e inerzia. (La teoria della relatività generale ci dice addirittura che peso e inerzia sono la stessa proprietà).

Per distinguere le diverse modalità di trasporto dell'energia descritti dai vari termini dell'equazione (2.2), non è necessario parlare di forme di energia: è sufficiente indicare qual è la grandezza estensiva che fluisce assieme all'energia. Invece di energia sotto forma di calore diciamo che accanto alla corrente di energia c'è anche una corrente di entropia.

L'equazione (2.2) permette di dare una descrizione semplice dei trasporti di energia: chiamiamo la grandezza estensiva che fluisce con l'energia il *portatore di energia*. L'energia è dunque letteralmente portata da entropia, carica elettrica, quantità di moto, quantità di materia, ecc. Un flusso del portatore può essere collegato a un flusso di energia più o meno intenso, a seconda del valore della corrispondente grandezza intensiva. Diciamo: il portatore può essere caricato con molta o poca energia.

La grandezza intensiva corrisponde quindi a una *misura di quanto il portatore sia carico di energia*. Negli apparecchi, che nel linguaggio tradizionale si chiamano trasformatori di energia, l'energia cambia semplicemente portatore. Entra nell'apparecchio con un portatore, viene trasferita ad un altro e lascia l'apparecchio con il secondo portatore.

In un corso per principianti non si hanno ancora a disposizione le grandezze estensive. Invece che da grandezze fisiche, il ruolo di portatore d'energia è ricoperto da correnti di sostanze. Così, come portatore d'energia in un tubo di un impianto di riscaldamento centrale, non viene indicata l'entropia ma l'acqua calda. Nel caso di trasporto di energia in un gasdotto, non diciamo che l'energia è portata dalla quantità di materia ma dal gas (Falk, Herrmann 1981a, Falk, Herrmann 1981b).

2.3 Strutture nella fisica

Le equazioni (2.1) e (2.2) permettono di riconoscere una struttura sistematica nella costruzione della fisica. I termini di destra in entrambe le equazioni hanno tutti la stessa struttura $y dX$ rispettivamente $y I_X$, dove y è una grandezza intensiva, X una grandezza estensiva e I_X l'intensità della corrente di X . Notiamo così che a ogni termine $y dX$ o $y I_X$ possiamo associare una delle aree classiche della fisica, visto che contiene solo grandezze caratteristiche di

	grandezza estensiva	intensità della corrente	grandezza intensiva
meccanica	quantità di moto p	forza F	velocità v
elettrologia	carica elettrica Q	intensità della corrente elettrica I	potenziale elettrico φ
termologia	entropia S	intensità della corrente di entropia I_S	temperatura T
chimica	quantità di materia n	intensità della corrente di materia I_n	potenziale chimico μ

Tabella 2.1. Classificazione delle grandezze fisiche per area della fisica e della chimica

quell'area. Queste correlazioni sono elencate nella tabella 2.1.

Se uno solo dei termini di destra nell'equazione (2.2) è diverso da zero, l'equazione stessa si riduce a:

$$P = yI_X \quad (2.3)$$

Questa relazione descrive un trasporto di energia nell'area corrispondente.

La tabella 2.1 contiene le basi per costruire un'analogia tra le diverse aree della fisica dalla portata molto più vasta di quanto possa sembrare a prima vista. Fornisce una rappresentazione di grandezze fisiche, relazioni, processi, fenomeni e apparecchi. Questa rappresentazione, in un primo tempo riferita unicamente alle strutture matematiche, consiglia di operare nelle varie aree della fisica secondo la stessa concezione. Nel presente corso facciamo ampio uso di questa possibilità. L'aspirazione a una razionalizzazione dell'insegnamento si fonda soprattutto sullo sfruttamento di questa analogia.

Abbiamo visto che in ogni area della fisica citata nella Tab. 2.1, due grandezze estensive ricoprono un ruolo importante: da un lato l'energia e dall'altro la grandezza estensiva caratteristica di quell'area, indicata nella seconda colonna della tabella. Così le due grandezze estensive della meccanica sono energia e quantità di moto, quelle dell'elettrologia energia e carica elettrica. In termologia sono energia e entropia e in chimica energia e quantità di materia.

La rappresentazione di queste aree diventa problematica ogni qualvolta si tenti di cavarsela con una sola grandezza estensiva. Ci volle molto tempo perché questo punto di vista si affermasse. Così nella famosa controversia tra cartesiani e leibniziani su quale fosse la vera misura delle forze in meccanica, per dirla in termini moderni, si trattava di stabilire se la grandezza "giusta" fosse la quantità di moto o l'energia cinetica. Si partiva dal presupposto che potesse essere una sola delle due.

Nonostante le due grandezze estensive della termodinamica, cioè energia e entropia, siano conosciute da più di 100 anni, nell'insegnamento si cerca ancora di presentare la maggior parte possibile della termodinamica senza l'entropia. Questa circostanza scoraggiante è il risultato dell'approccio tradizionale alla termologia. Dalla Tab. 2.1 si capisce che questo approccio corrisponde a un'elettrologia che operi senza carica elettrica e senza corrente elettrica

(Fuchs 1986) o a una meccanica dove non esistano né quantità di moto né forza.

Le osservazioni fatte finora mostrano che l'energia in fisica occupa un ruolo centrale. L'energia è altrettanto importante nella meccanica, nella termologia e nell'elettrologia. Esiste però un'altra grandezza che, con l'energia, soddisfa i medesimi requisiti: la quantità di dati - quella grandezza la cui unità di misura è il bit.

Esattamente come distinguiamo i vari tipi di trasporto d'energia a seconda dei *portatori di energia*, possiamo distinguere i trasporti di dati a seconda dei *portatori di dati*. E, così come ogni portatore di energia è caratteristico di un'area della fisica, ogni portatore di dati appartiene a una sola di queste stesse aree. Così un trasporto di dati dove la *luce* funge da portatore sarà caratteristico dell'ottica. Il portatore di dati *suono* corrisponde all'acustica e in elettronica si ha a che fare con l'elettricità come portatore, vedi la Tabella 2.2. Maggiori dettagli sull'analogia tra energia e dati in *Daten und Energie* (Herrmann, Schmäzle 1987).

2.4 I concetti di corrente, spinta e resistenza

Nel paragrafo 2.2 abbiamo visto come possiamo immaginare le grandezze estensive: interpretiamo la grandezza I_X come intensità della corrente del portatore d'energia e la grandezza intensiva y come misura di quanto il portatore è carico di energia.

Consideriamo ora una seconda immagine che possiamo farci delle grandezze intensive. Un'immagine che a dire il vero è molto diffusa e conosciuta, anche se di solito viene utilizzata solo nell'elettrologia. La sua forza però sta nel fatto che può essere applicata con gli stessi vantaggi anche in meccanica, termologia e chimica. La spieghiamo con un esempio familiare preso dall'elettrologia.

Tabella 2.2. Le aree della fisica relative alla tecnica dei dati

	portatore di dati
ottica	luce
acustica	suono
elettronica	elettricità

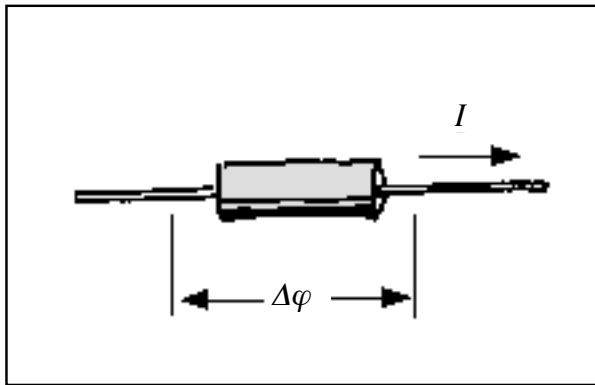


Fig. 2.5. La differenza di potenziale tra le estremità della resistenza viene interpretata come spinta della corrente elettrica.

Una corrente elettrica fluisce attraverso una resistenza, che non deve necessariamente essere ohmica, Fig. 2.5. Già le parole utilizzate per descrivere la situazione si basano sull'immagine che abbiamo di quanto succede: parliamo di una "corrente" quando la grandezza I ha un valore non nullo e chiamiamo "resistenza" una struttura dove viene prodotta entropia. È esattamente questa immagine, usata inconsciamente da ogni fisico, che vogliamo sviluppare trasferendola anche a correnti non elettriche e che vogliamo usare in modo sistematico nel presente corso.

Chiamiamo dunque la grandezza I intensità di corrente della grandezza Q . Il fatto che la corrente che fluisce attraverso la struttura in Fig. 2.5 è tanto più intensa quanto maggiore è la differenza di potenziale $\Delta\varphi$, viene interpretato dicendo che la differenza di potenziale è la "spinta" che genera la corrente. In questo modello la corrente non fluisce spontaneamente perché ostacolata dalla resistenza dell'oggetto che attraversa.

Con l'esempio della resistenza ohmica vogliamo mostrare quanto sia arbitrario questo modello. Per una resistenza ohmica vale:

$$U = R \cdot I.$$

L'equazione dice che U e I sono direttamente proporzionali: una U maggiore corrisponde a una I maggiore oppure una I maggiore corrisponde a una U maggiore. In nessun caso ci dice però quale è causa dell'altra. Non dice che la tensione genera la corrente ma nemmeno che la corrente genera la tensione. Di conseguenza decidere che è la tensione a causare la corrente è puro arbitrio. Il motivo per cui ci sembra più naturale considerare la tensione, e non la corrente, come la causa, dipende dal fatto che è più facile regolare una tensione che non una corrente. Nel caso in cui sia il valore di corrente a essere prestabilito, per esempio utilizzando un generatore stabilizzato, si parla effettivamente di una caduta di tensione "causata" da una corrente.

Malgrado la sua arbitrarietà questo modello ha dei grossi vantaggi per lo studente perché, per capire fenomeni elettrici o per risolvere problemi di elet-

rotecnica, ci si può riferire ai fenomeni dai quali questa immagine è mediata: correnti di liquidi e gas o, più concretamente, di acqua e aria.

Noi ci serviamo di questo modello anche perché, oltre che nell'elettrologia, è utilizzabile anche in meccanica, termologia e chimica.

Il modello di spinta e resistenza è utile per capire sia le grandezze intensive che quelle estensive. In elettrologia è utile soprattutto per una descrizione della grandezza intensiva "potenziale elettrico"; in chimica è usato per introdurre la grandezza intensiva "potenziale chimico". Invece della grandezza intensiva termodinamica, la temperatura, gli studenti hanno già una buona rappresentazione concettuale. In questo caso il modello di spinta e resistenza serve per l'introduzione della grandezza estensiva entropia.

Per permettere agli studenti di acquisire dimestichezza con questo modello, il corso è preceduto da un'unità didattica sulle correnti di liquidi e gas. La maggior parte dei concetti più importanti del corso vengono trattati a fondo già in questo capitolo.

Si noti anche che il modello di spinta e resistenza ben si adatta alla struttura unitaria della fisica citata nel capitolo precedente e contribuisce di conseguenza alla semplificazione del suo insegnamento.

2.5 Relazioni e grandezze più importanti

Per cominciare elenchiamo le grandezze più importanti utilizzate in questo corso.

Grandezze estensive

energia E
 quantità di moto p
 quantità di moto angolare L
 carica elettrica Q
 entropia S
 quantità di materia n
 quantità di dati H

Grandezze intensive

velocità v
 potenziale elettrico φ
 temperatura T
 pressione p
 potenziale chimico μ

Intensità di corrente

di corrente d'energia (= potenza) P
 di corrente di quantità di moto (= forza) F
 di corrente elettrica I
 di corrente d'entropia I_S
 di corrente di sostanza I_n
 di corrente di dati I_H

Oltre a queste, vengono introdotte altre grandezze che non rientrano in nessuna delle tre categorie: innanzitutto spazio e tempo; poi alcune costanti del materiale così come grandezze che caratterizzano

Tabella 2.3. Le relazioni più importanti

relazione tra quantità e intensità della corrente	relazione tra corrente di energia e corrente del portatore di energia	capacità	resistenza
$F = p/t$	$P = vF$	$m = p/v$	solo qualitativamente
$I = Q/t$	$P = UI$	$C = Q/U$	$R = U/I$
$I_S = S/t$	$P = TI_S$	$\Delta S/\Delta T$ (senza simbolo)	solo qualitativamente
$I_n = n/t$	$P = (\mu_2 - \mu_1)I_n$	non viene trattata	solo qualitativamente

delle apparecchiature tecniche come la costante della molla k , la resistenza elettrica R e la capacità C .

Le relazioni matematiche in cui appaiono queste grandezze possono essere suddivise in classi sulla base della struttura discussa nei paragrafi precedenti. Ogni relazione all'interno di una classe si ottiene mediante una trasposizione formale di un'altra relazione della stessa classe. La trasposizione consiste nella sostituzione delle grandezze di una riga della Tab. 2.1 con le grandezze di un'altra riga. Solo l'energia e l'intensità della sua corrente non vengono sostituite.

Le relazioni più importanti trattate nel corso sono riassunte in tabella 2.3. In ogni colonna sono raggruppate le relazioni appartenenti alla stessa classe. Ogni riga corrisponde a una delle quattro discipline: meccanica, elettrologia, termologia e chimica, già usate per classificare le grandezze in Tab. 2.1.

Le equazioni della prima colonna descrivono la relazione tra le grandezze estensive e le relative intensità di corrente. In effetti al posto del quoziente tra una grandezza estensiva e il tempo, dovrebbe esserci un quoziente differenziale. Di conseguenza queste equazioni sono valide solo nel caso in cui l'intensità di corrente corrispondente è costante. Nella stessa classe di relazioni rientrano anche le equazioni

$$P = E/t$$

e

$$I_H = H/t$$

che però non appartengono a nessuna delle righe in Tab. 2.3.

Le equazioni della seconda colonna descrivono la relazione tra le intensità del flusso di energia e la corrente della grandezza estensiva che accompagna il flusso di energia. Sono equazioni della stessa forma dell'equazione (2.3), che fissano la scala della grandezza intensiva, che ne spiegano cioè la costruzione dei multipli.

I quozienti in colonna 3 potrebbero genericamente essere definiti delle capacità in quanto hanno tutti la stessa struttura della capacità elettrica. Così la massa si può interpretare come la capacità di quantità di

moto di un corpo. A una velocità data, un corpo contiene tanta più quantità di moto quanto maggiore è la sua massa. Per la *capacità di entropia* $\Delta S/\Delta T$ non viene utilizzato nessun simbolo specifico anche se la grandezza è tecnicamente importante: è la misura della capacità di un corpo di immagazzinare calore.

La relazione tra corrente e spinta in processi dissipativi, colonna 4, viene trattata solo in modo qualitativo, con l'eccezione della legge di Ohm: più grande è la spinta, maggiore sarà l'intensità della corrente.

2.6 La scala delle grandezze più importanti

Quando si introduce una nuova grandezza fisica devono esserne fissati i multipli dell'unità. Il procedimento di definizione di una scala, cioè dei multipli, è sostanzialmente lo stesso per tutta una serie di grandezze. In particolare, ognuna delle tre classi di grandezze discusse nel paragrafo precedente ha il proprio procedimento per la definizione di una scala. Ci limiteremo qui alla discussione di queste tre classi.

Generare dei multipli di una grandezza estensiva è, perlomeno concettualmente, banale. Per produrre il doppio, triplo, ecc. del valore di una grandezza estensiva dobbiamo solo realizzare due, tre, ecc. versioni di tutto il sistema. Se vogliamo aumentare il valore di una grandezza estensiva in un sistema di 1, 2, ... n unità, allora dobbiamo trasferire al sistema 1, 2, ... n unità della grandezza in questione. Questo trasferimento in molti casi è molto semplice - come nel caso della carica elettrica, ad esempio utilizzando un cucchiaino di Faraday, Fig. 2.6 - in altri tecnicamente complesso, come nel caso dell'energia.

Per definire i multipli delle intensità di corrente, consideriamo una corrente che attraversi un conduttore dall'estensione laterale ben delimitata. Inoltre nel conduttore non devono esserci sorgenti o scariche della corrente. Per ottenere nel conduttore considerato dei multipli di una certa intensità, sfruttiamo la regola dei nodi: facciamo confluire in un nodo 1, 2, ... n correnti, ognuna di intensità unitaria. In Fig. 2.7 è raffigurato l'esempio di una corrente elettrica, in Fig. 2.8 quello di una forza, cioè di una corrente di quantità di moto.

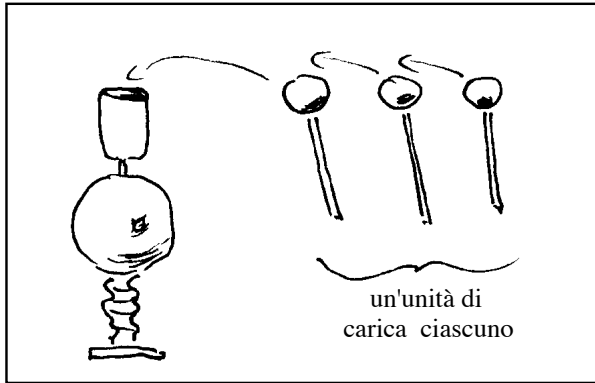


Fig. 2.6. La carica elettrica della sfera viene aumentata di tre unità.

La definizione di una scala per le grandezze intensive è più complicata e passa, come già accennato, per le equazioni in colonna 2 della tabella 2.3. Ci riferiamo nuovamente all'esempio dell'elettricità. Confrontiamo due circuiti elettrici A e B, Fig. 2.9. L'intensità di corrente elettrica sia la stessa in entrambi. Ora, se nel circuito A la corrente d'energia è due volte più intensa che nel circuito B, allora anche la tensione A è doppia della tensione B.

Anche se la determinazione della scala per una grandezza rappresenta un passo importante nella definizione della grandezza stessa, consigliamo di non dedicare troppo spazio alla questione in un corso per scuole secondarie, in quanto la costruzione di multipli è quasi sempre o banale o difficile.

3. Bibliografia

FALK, G.: Theoretische Physik, Band II. Springer Verlag, Berlin (1968).

FALK, G.: Was an der Physik geht jeden an? Phys. Blätter 33, 616 (1977).

FALK, G.: Die begriffliche Struktur der Physik. Konzepte eines zeitgemäßen Physikunterrichts, Heft 3, Pag. 7. Hermann Schroedel Verlag KG, Hannover (1979).

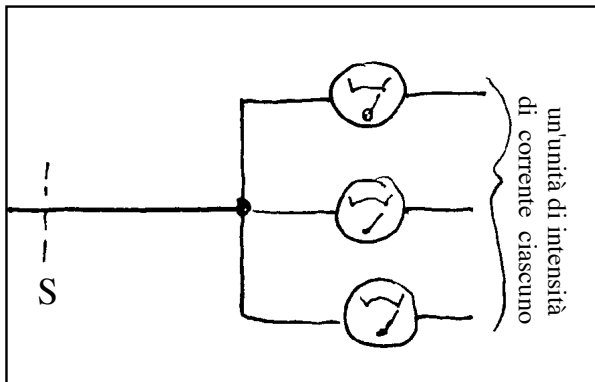


Fig. 2.7. Attraverso la sezione S fluiscono tre unità di intensità di corrente elettrica.

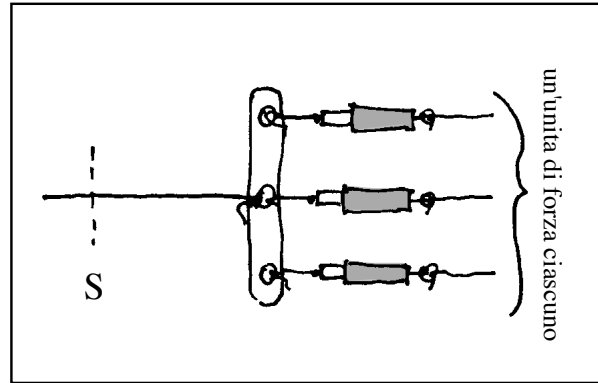


Fig. 2.8. Attraverso la sezione S fluiscono tre unità di intensità di corrente di quantità di moto.

FALK, G., HERRMANN, F.: Neue Physik - das Energiebuch. Hermann Schroedel Verlag KG, Hannover (1981a).

FALK, G., HERRMANN, F.: Neue Physik - das Energiebuch, Lehrenheft. Hermann Schroedel Verlag KG, Hannover (1981b).

FALK, G., HERRMANN, F., SCHMID, G.B.: Energy forms or energy carriers? Am. J. Phys. 52, 794 (1984).

FALK, G., RUPPEL, W.: Energie und Entropie. Springer Verlag, Berlin (1976).

FUCHS, H.: A surrealistic tale of electricity. Am. J. Phys. 54, 907 (1986).

HERRMANN, F., SCHMÄLZLE, P.: Daten und Energie. J.B. Metzler und B.G. Teubner, Stuttgart (1987).

HERRMANN, F.: Is an energy current energy in motion? Eur. J. Phys. 7, 198 (1986).

SCHMID, G. B.: An up-to-date approach to physics. Am. J. Phys. 52, 794 (1984).

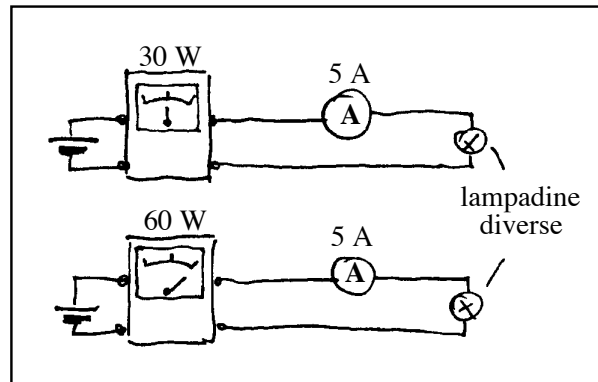


Fig. 2.9. L'intensità P della corrente di energia è doppia nel dispositivo inferiore che in quello superiore, l'intensità I della corrente elettrica è uguale. La scala della tensione U è fissata in modo che in entrambi i casi valga $P = UI$.

B. Osservazioni

1. Energia e portatori di energia

1. L'energia come grandezza estensiva

L'energia viene introdotta come una grandezza dalle caratteristiche estensive. Parliamo dell'energia come parliamo di una sostanza. L'uso dell'energia risulta facilitato rispetto alla normale derivazione attraverso il concetto di lavoro.

2. Grandezze fisiche o sostanze come portatori di energia?

L'introduzione dei portatori di energia è una conseguenza della legge secondo la quale in ogni trasporto di energia è coinvolta almeno un'altra grandezza estensiva. Quando si tratta di trasporto di energia meccanica è la quantità di moto, per l'energia elettrica la carica elettrica, per quella termica l'entropia e per quella chimica la quantità di materia. Abbiamo proposto di chiamare portatori di energia queste grandezze che accompagnano la corrente di energia.

Per non appesantire un corso per principianti con l'introduzione di un gran numero di nuove grandezze fisiche, non designiamo queste grandezze come portatori di energia ma le sostituiamo con sostanze che le contengano. Così invece di entropia si parla in un primo momento dei portatori di energia "acqua calda" o "aria calda" o dei portatori di energia "benzina" o "gasolio" invece di quantità di materia.

3. La quantità di moto angolare come portatore di energia

Così come la forza può essere interpretata come intensità della corrente di quantità di moto, possiamo interpretare il momento meccanico come intensità della corrente di quantità di moto angolare. Quindi l'equazione

$$M = dL/dt$$

(M = momento meccanico, L = quantità di moto angolare) afferma quanto segue: la variazione nel tempo del momento meccanico di un corpo equivale all'intensità della corrente di quantità di moto che fluisce nel corpo stesso.

4. Portatori di energia del tipo "vuoto a rendere" e del tipo "vuoto a perdere"

La distinzione tra portatori di energia del tipo "vuoto a rendere" o "vuoto a perdere" non ha nessun profondo significato fisico. La facciamo solamente perché rappresenta un buon esercizio nella distinzione del percorso dell'energia dal percorso del portatore di energia. Si nota facilmente come ogni trasporto del tipo "vuoto a rendere" può essere trasformato in un trasporto del tipo "vuoto a perdere" e viceversa. Si potrebbe per esempio far rifluire nel compressore l'aria che fuoriesce da un martello pneumatico. In questo modo diventerebbe un portatore di energia del tipo "vuoto a rendere".

Introduciamo la quantità di moto angolare come portatore del tipo "vuoto a rendere". Nella maggioranza dei casi ciò è giustificato, ad esempio considerando un motore che aziona una pompa, entrambi montati sullo stesso basamento o supporto. La quantità di moto angolare fluisce dal motore alla pompa attraverso l'albero motore e, attraverso il basamento o il supporto, torna dalla pompa al motore.

Nel caso di un ventilatore azionato da un motore, non è così. La quantità di moto angolare viene trasmessa dal motore alle pale del ventilatore attraverso l'albero motore, da lì viene dispersa nell'aria, va a terra in modo difficilmente controllabile e infine torna al motore. In questo caso propenderemmo per definire la quantità di moto angolare come portatore del tipo "vuoto a perdere". Abbiamo però tralasciato queste sottili differenze.

2. Correnti di liquidi e gas

1. Correnti di aria e acqua come modelli di correnti di grandezze fisiche.

In questo capitolo vengono introdotti concetti e strutture che nel seguito del corso sono usati di continuo.

L'oggetto della riflessione - correnti di aria e acqua - è molto familiare agli studenti. Non solo l'acqua si può vedere, ma spesso si può addirittura riconoscere a occhio nudo se sta scorrendo. Anche delle correnti d'aria gli studenti hanno un'idea ben chiara.

Mentre qui consideriamo correnti di sostanze, le correnti di cui si parlerà nel prosieguo del corso saranno concetti molto più astratti, si tratta delle correnti di grandezze fisiche. Più tardi i concetti e le relazioni introdotti in questo capitolo si potranno applicare facilmente alle correnti di grandezze fisiche. In particolare, anche le rappresentazioni che gli studenti si faranno dei processi qui discussi dovranno essere applicate alle correnti di grandezze fisiche.

2. Concetti di base per le lezioni future

I concetti e le relazioni seguenti compariranno molte volte nel corso:

- *Intensità di corrente.* La quantità di una sostanza o di una grandezza fisica estensiva che fluisce in un punto determinato in un certo intervallo di tempo, divisa per quell'intervallo di tempo.
- *Spinta.* Differenza dei valori di una grandezza intensiva. Maggiore è la spinta, più grande sarà l'intensità di corrente.
- *Resistenza.* Una proprietà del conduttore. Dipende da lunghezza e sezione.
- *Equilibrio.* Stato nel quale non fluisce nessuna corrente anche in presenza di un collegamento; non c'è spinta.
- *Regola dei nodi.* Forma dell'equazione di bilancio nel caso in cui non ci siano né sorgenti né scarichi.
- *Regola delle maglie.* A ogni punto di un conduttore può essere associato un valore della grandezza intensiva.
- *Portatore di energia.* La corrente di una sostanza o di una grandezza estensiva è associata a una corrente di energia.

3. La misura quantitativa di correnti d'aria e acqua

La grandezza usata come misura della quantità dei liquidi e dei gas considerati, è il volume. Parliamo comunque di correnti di acqua o aria e non di correnti di volume in quanto la grandezza corrente di volume non esiste.

4. Le correnti di materia hanno più di una spinta.

Visto che con una corrente di materia fluisce anche tutta una serie di grandezze fisiche, c'è anche tutta una serie di spinte all'origine di una corrente di materia. Per ogni grandezza estensiva che fluisce con la materia c'è una corrispondente grandezza intensiva, e un gradiente di quest'ultima può avere come conseguenza un flusso della materia. Così, un liquido non scorre solamente a causa di una differenza di pressione ma anche, per esempio, a causa di una differenza di potenziale gravitazionale, in altre parole: scorre spontaneamente dall'alto verso il basso. Per motivi di chiarezza in questo capitolo verranno considerate solo situazioni dove le spinte diverse dalla differenza di pressione non hanno nessuna influenza.

5. La pressione come grandezza indipendente

La pressione non è ricondotta alla forza come viene fatto comunemente ("pressione uguale forza fratto superficie") anche perché delle due grandezze, forza e pressione, la forza è sicuramente quella che crea maggiori difficoltà. A rendere difficile il concetto di forza sono le questioni di segno e direzione e, strettamente connessi, i concetti di forza contraria ed equilibrio di forze. Sotto questo aspetto la pressione è più semplice. È, quantomeno nei nostri esempi, uno scalare il cui valore si riferisce a un punto dello spazio. Non c'è bisogno di specificare chi esercita una pressione su chi (come invece si fa con le forze). Nei nostri casi di correnti di gas e liquidi, i valori della pressione sono addirittura sempre positivi.

Che un oggetto solido possa essere sottoposto a tensioni diverse in direzioni diverse è facile da immaginare. Che le direzioni indipendenti siano esattamente tre è invece più difficile da capire e anche da dimostrare con gli strumenti a disposizione nelle lezioni. Per questo motivo il fatto viene semplicemente spiegato dal docente.

3. Trasmissione idraulica di energia

A nostro modo di vedere c'è un aspetto dell'idraulica che viene spesso trascurato. Il motivo principale che spiega la grande diffusione degli impianti idraulici sta nel fatto che permettono di trasmettere comodamente energia. Per questo motivo nel nostro corso il trasporto idraulico di energia avrà un'importanza maggiore di quella solitamente attribuitagli.

10 Entropia e correnti di entropia

1. Entropia sin dall'inizio

Entropia e temperatura hanno nei processi termici lo stesso ruolo di carica elettrica e potenziale elettrico nei processi elettrici e di quantità di moto e velocità in quelli meccanici. Entropia, carica elettrica e quantità di moto sono grandezze estensive; temperatura, potenziale elettrico e velocità, le rispettive grandezze intensive "coniugate all'energia". Da questa contrapposizione capiamo che l'entropia ha per la termologia la stessa importanza della carica elettrica per l'elettrologia e della quantità di moto per la meccanica. E le correnti di entropia hanno in termologia un ruolo importante come le correnti elettriche in elettrologia e le forze (correnti di quantità di moto) in meccanica. È quindi coerente cominciare la termologia con l'entropia. Termologia senza entropia è solo una soluzione di ripiego.

2. La grandezza di stato entropia come misura del calore

È molto diffusa l'opinione che l'entropia sia una grandezza difficile, di cui sia molto arduo farsi un'idea. È sicuramente così se l'entropia viene introdotta alla maniera di Clausius. Se invece la si introduce statisticamente è facile immaginarla come la misura del disordine microscopico di un sistema. Questa rappresentazione concettuale è però di scarsa utilità per la soluzione di problemi.

Di conseguenza abbiamo scelto una terza via per l'introduzione dell'entropia, una via che si rifà a Callendar (1911) e che è stata minuziosamente descritta e motivata da Job (1972) e Falk (1985). Si basa sulla comprensione del fatto che l'entropia concorda molto bene con le caratteristiche del concetto comunemente chiamato "calore" o "quantità di calore". Questa concordanza è così buona da poter affermare che non ci sono altre grandezze fisiche delle quali l'esperienza comune ci dia una rappresentazione concettuale migliore.

Naturalmente per la grandezza S non possiamo utilizzare il nome "calore" in quanto in fisica questa parola è usata diversamente: si usa per definire, anche se non del tutto unanimemente, la forma differenziale $\delta Q = TdS$. Farsi un'idea precisa di questa forma è però molto difficile, se non impossibile. La Q dopo il segno differenziale δ non è nemmeno una grandezza fisica. A volte ciò viene espresso dicendo che Q è una grandezza di processo mentre entropia e energia sono grandezze di stato. Detto così sembrerebbe che le grandezze di stato siano delle rarità. Invece tutte le grandezze conosciute della fisica sono grandezze di stato, con due sole eccezioni: il calore e il lavoro. È così normale per chiunque considerare una grandezza come una grandezza di stato, che di solito non viene neanche in mente di sottolinearlo. La costruzione poco felice, e da un punto di vista odierno anche

superflua, dei concetti di calore e lavoro, crea spesso confusione tra gli studenti e persino tra i fisici esperti.

Nel testo per studenti non usiamo la "grandezza di processo" Q in termologia, così come in meccanica abbiamo operato senza il lavoro.

3. Effetti termici grandi e piccoli

La decisione di introdurre l'entropia all'inizio della termologia ci dà anche la possibilità di ribilanciare i temi trattati nelle lezioni di termologia. Fenomeni, apparecchi e impianti il cui funzionamento viene determinato grazie a correnti di entropia, p. es. motori termici, impianti di riscaldamento, pompe di calore e il bilancio termico della Terra, sono messi in primo piano. Altri fenomeni tradizionalmente trattati in un corso di termologia, sono messi in disparte: come la dilatazione termica dei corpi solidi, un effetto dell'ordine di grandezza 10^{-4} .

4. La scala di temperatura

Spesso a scuola, ma anche all'università, ci si creano inutili problemi nella definizione della scala di temperatura. Si comincia con la definizione di una scala basata sulla dilatazione del mercurio, poi se ne introduce una migliore basata sulla dilatazione dei gas per giungere infine a una terza scala, l'odierna e vincolante scala termodinamica. Da questa rievocazione dell'evoluzione storica si potrebbe ricavare l'impressione che la determinazione di una scala di temperatura sia un compito particolarmente difficile. In effetti per qualsiasi altra grandezza potremmo cominciare introducendo una scala peggiore per introdurre man mano di sempre migliori.

Il fatto che di solito non si cominci con la più comoda scala termodinamica è conseguenza del tentativo di trattare più termodinamica possibile senza usare l'entropia.

5. Illusioni sensoriali

Ci sono argomenti trattati a lezione che si sono quasi trasformati in rituali. Così la necessità di una misurazione della temperatura viene spesso giustificata dall'estrema facilità con cui i nostri sensi possono essere ingannati nella percezione della temperatura. Illusioni sensoriali come questa sono un argomento interessante. Si tenga però presente che accadono con tutte le percezioni sensoriali: di luminosità e colore, di altezza, distanza e velocità, di tempo, di forza e massa, di intensità sonora e altezza del suono. Naturalmente per gli esseri viventi queste "illusioni" hanno una funzione importante e positiva, non rappresentano solamente un'inadeguatezza dei nostri organi sensoriali. Senza dubbio le illusioni sensoriali sono un argomento da corso di fisica., non dovrebbero però essere discusse solo sull'esempio della temperatura.

6. Osservazione e spiegazione nell'esperimento

Nella discussione di molti esperimenti procediamo nel modo seguente: innanzitutto descriviamo l'*osservazione*. Questa descrizione consiste in un'affermazione sulla *temperatura*, p. es.: "la temperatura dell'acqua nel recipiente A diminuisce, quella dell'acqua nel recipiente B aumenta." Poi chiediamo una *spiegazione*. Con ciò intendiamo che viene detto cosa succede all'*entropia* nel processo, quindi nel nostro esempio: "dell'entropia va da A a B". Confronta con l'osservazione 9 al capitolo 3.

7. Quali sono i processi con la maggiore produzione di entropia?

C'è spesso confusione su quali siano i processi con produzione di molta e quali di poca entropia. Sulla Terra il processo che produce di gran lunga più entropia di qualsiasi altro, è l'assorbimento della luce solare.

8. Bibliografia

CALLENDAR, H.L.: Proc. Phys. Soc. London 23, 153, (1911).

FALK, G.: Entropy, a resurrection of caloric - a look at the history of thermodynamics. Eur. J. Phys. 6, 108 (1989).

JOB, G.: Neudarstellung der Wärmelehre - die Entropie als Wärme. Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt am Main (1972).

11. Entropia e energia

1. Sul significato della costante del materiale "capacità termica specifica"

La capacità entropica e la capacità entropica specifica, che noi usiamo al posto della capacità termica specifica, non hanno un ruolo molto importante in questo corso. La dipendenza dal materiale della capacità entropica specifica (così come quella della capacità termica specifica) è molto piccola se confrontata con quella di altre costanti del materiale (come la conducibilità elettrica, la conducibilità termica, la densità o varie costanti ottiche). La dipendenza dal materiale della capacità entropica diventa ancora più piccola se viene riferita alla quantità di materia invece che alla massa. Per di più non c'è praticamente nessun fenomeno basato sulla differenza della capacità termica specifica di diverse sostanze. Giustificare in questo modo la differenza tra il clima continentale e quello marittimo, come a volte si fa, è sbagliato. (Il fatto che nell'acqua di mare si possa immagazzinare più entropia che nella roccia della terraferma, dipende dal fatto che il movimento dell'acqua permette un migliore trasporto di entropia dalla superficie agli strati più profondi che non sulla terraferma.)

2. Pompe di calore ideali

A lezione facciamo come se le pompe di calore di cui parliamo funzionassero senza perdite, cioè come se non vi venisse prodotta entropia. Lo facciamo con lo stesso diritto per cui nella trattazione dei motori elettrici, dei trasformatori o di macchine puramente meccaniche, inizialmente tralasciamo le perdite.

3. Esperimenti sull' "attrito termico"

Con un calcolo semplice e convincente si dimostra che nell'esperimento descritto nel paragrafo 11.3, Fig. 11.7, viene prodotta entropia. Non vale però la pena effettuare veramente l'esperimento. Per misurare l'intensità delle correnti di entropia non c'è un procedimento facile come per esempio quello per misurare l'intensità di una corrente elettrica. Già la misurazione delle correnti di energia sarebbe difficile e per di più non vedremmo nemmeno ciò che rende interessante l'effetto discusso, cioè l'aumento di entropia.

Se volessimo mostrare in modo convincente che l'entropia aumenta, dovremmo presentare un esperimento nel quale qualcosa si *riscalda*. Nell' "esperimento" del paragrafo 11.3 però, la corrente di entropia ha la massima intensità proprio là dove la temperatura è più bassa: all'estremità fredda della sbarra. Questa non è assolutamente una contraddizione. Dobbiamo solo immaginare che la velocità della corrente d'entropia sia più grande che all'estremità calda.

L'unico esperimento noto che permette di dimostrare direttamente l'entropia prodotta per "attrito termico", è l'oscillatore a gas descritto nel corso PSSC (1974). In questo esperimento l'attrito termico provoca lo smorzamento di un'oscillazione meccanica. Purtroppo è quasi impossibile costruire l'esperimento senza l'aiuto di una buona officina.

Possiamo ideare facilmente una variante dell'esperimento PSSC dove l'attrito termico causa veramente un aumento di temperatura. Il trucco sta nel forzare più volte l'entropia di un gas attraverso una resistenza termica. Il gradiente di temperatura necessario si ottiene con ripetute compressioni ed espansioni isoentropiche del gas.

4. Contenuto di entropia e contenuto di calore

Per la trattazione di temi tradizionalmente associati ai concetti di calore specifico, calore di evaporazione e calore di fusione, l'entropia presenta parecchi vantaggi visto che, al contrario della "quantità di calore", è una grandezza di stato. Quindi può assumere il ruolo di un vero contenuto di calore. Di conseguenza, nelle nostre lezioni è sempre di primaria importanza il *contenuto* di entropia; le *variazioni* di entropia sono interpretate come differenze dei contenuti di entropia. Questo vale sia per i processi legati a un aumento della temperatura che per le transizioni di fase.

Con la forma di energia "quantità di calore" non si può procedere allo stesso modo in quanto non esiste un contenuto di calore fondato su questa grandezza. Si può parlare solamente di calore fornito o ceduto calore fornito per intervallo di temperatura o calore fornito in una transizione di fase. L'esperienza insegna che non si riesce a far capire agli studenti come mai questo concetto di "contenuto di calore" non abbia significato fisico alcuno, soprattutto perché gli esperimenti di mescolamento che tanto volentieri si fanno a lezione contribuiscono a sostenere questa concezione errata.

5. Valori d'entropia

Il motivo per cui a molti fisici e insegnanti di fisica l'entropia appare sospetta, è che non abbiamo il senso per i valori di questa grandezza. I chimici non hanno questo problema. Nelle loro tabelle per molte sostanze, oltre alla capacità termica, all'entalpia di formazione e a valori di altre grandezze, potete trovare anche il contenuto di entropia (di solito per mole) della sostanza a condizioni normali. Per alcune sostanze importanti si possono addirittura trovare i valori di queste grandezze in funzione della temperatura da $T = 0$ K su su fino a qualche centinaio di Kelvin, superando le transizioni di fase più disparate. Consigliamo anche agli insegnanti di fisica di convincersi di quanto sia comodo l'uso di queste tabelle.

6. Vantaggi e svantaggi della tradizionale quantità di calore

A favore della tradizionale "quantità di calore" si possono esprimere i seguenti argomenti:

1. Gli esperimenti di mescolamento si interpretano facilmente facendo dei bilanci energetici, visto che l'energia rimane costante. Per contro, mescolando si produce entropia. Dopo il processo di mescolamento la quantità di entropia è quindi maggiore di prima.

2. In un ampio intervallo di temperatura la capacità termica specifica è costante, cioè indipendente dalla temperatura. La capacità entropica specifica invece, ottenuta dalla capacità termica specifica dividendo per la temperatura, dipende dalla temperatura.

Crediamo che questi svantaggi dell'entropia non siano gravosi se paragonati agli svantaggi connessi all'uso della "quantità di calore", che non è una grandezza di stato.

Aggiriamo il primo dei due problemi svolgendo degli esperimenti di mescolamento dove le differenze di temperatura non sono troppo elevate. In quel caso la quantità di entropia prodotta è piccola in rapporto all'entropia trasportata.

Riguardo al secondo punto: questo vantaggio dell'energia sull'entropia non è di fondamentale importanza. Dopotutto anche la tradizionale capacità termica specifica è indipendente dalla temperatura solo in un'intervallo di temperatura limitato. Il calcolo con la capacità entropica specifica è sì un po' più faticoso di quello con la capacità termica specifica, ma per molti problemi è sufficiente prendere il valore medio della capacità entropica.

7. Bibliografia

PSSC: Physik. S. 380. Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig (1974).

12. Transizioni di fase

1. Transizioni di fase come reazione chimica

Una transizione di fase è un caso speciale di reazione chimica: il caso in cui un'unica sostanza iniziale si trasforma in un'unica sostanza finale. Si potrebbe essere indotti a credere che il potenziale chimico sia particolarmente adatto per trattare le transizioni di fase. In generale è anche così. Le transizioni tra le fasi solida, liquida e gassosa sono però un'eccezione, in quanto di solito si svolgono senza nessun ostacolo. Nei casi più importanti le fasi sono sempre in equilibrio chimico. Ciò significa che la differenza di potenziale chimico tra le fasi è nulla e quindi il potenziale chimico non appare nemmeno come una variabile.

2. Entropia e entalpia

Quando in termodinamica si pone in primo piano l'energia invece dell'entropia, sorgono dei problemi che appaiono particolarmente evidenti nella trattazione del processo di evaporazione. Se facciamo evaporare acqua con un riscaldatore a immersione, l'energia che il riscaldatore cede durante l'evaporazione non si ritrova interamente nel vapore acqueo, come gli studenti potrebbero supporre. Una parte di questa energia è necessaria per "spingere via l'atmosfera". Per l'entropia invece le aspettative sono rispettate: l'entropia proveniente dal riscaldatore finisce semplicemente nel vapore. Tradizionalmente un processo del genere è descritto anche dicendo che l'energia ceduta dal riscaldatore a immersione provoca una variazione equivalente dell'entalpia dell'acqua. L'entalpia è sì una grandezza di stato, ma è comunque assolutamente inadatta per la scuola e in particolare in un corso per principianti: non è una grandezza estensiva. Non c'è nessuna corrente di entalpia e non ha nessun senso parlare di conservazione o di non conservazione dell'entalpia.

E n t r o p i a

10. Entropia e correnti di entropia

La seconda grande area della fisica di cui ci occupiamo è la termologia. Già dal nome possiamo intuire di cosa si tratta: della descrizione di fenomeni che dipendono da quanto un oggetto sia caldo o freddo. Così come in meccanica abbiamo sempre fatto il bilancio della quantità di moto, in termologia avremo costantemente a che fare con bilanci termici.

Anche la termologia è importante per capire fenomeni naturali, apparecchiature tecniche e macchine.

La vita sulla Terra è possibile solo grazie a un'enorme corrente di calore che viene dal Sole. Il clima e le condizioni meteorologiche sulla Terra sono determinati principalmente da processi termici. ("Termici" nel senso di "inerenti lo studio del calore".)

Molte macchine funzionano sfruttando le leggi della termologia: il motore di un'auto, la turbina a vapore delle centrali elettriche, la pompa di calore del frigorifero.

La perdita di calore di ogni casa e la fornitura di calore mediante impianto di riscaldamento, possono essere descritte quantitativamente grazie alla termologia.

Da non dimenticare è il ruolo importante ricoperto dal calore nel corso delle reazioni chimiche.

La termologia si occupa quindi di fenomeni diversi della meccanica. Per questo motivo usa anche grandezze fisiche diverse. Ciò non significa però che trattando di termologia si possa dimenticare completamente la meccanica. Primo, perché alcune grandezze sono usate sia in meccanica che in termologia: ad esempio l'energia e l'intensità della corrente di energia. Secondo, perché ci sono leggi, relazioni e regole della meccanica, che hanno un loro corrispondente in termologia. Quindi, non dobbiamo ricominciare da zero per capire la termologia.

10.1 Entropia e temperatura

Come ogni volta che affrontiamo una nuova area della fisica, cominciamo conoscendo i nostri strumenti più importanti: le grandezze fisiche con le quali lavoreremo. In meccanica avevamo iniziato con due grandezze per descrivere lo stato di moto di un corpo: con la velocità e la quantità di moto. Analogamente, iniziamo termologia con due grandezze che descrivono lo stato termico di un corpo.

Una di queste grandezze ti è già nota: la *temperatura*. Si abbrevia con la lettera greca ϑ (leggi: teta) e si misura in $^{\circ}\text{C}$ (leggi: gradi Celsius). La frase "la temperatura è di 18 gradi Celsius", può quindi essere riassunta in:

$$\vartheta = 18^{\circ}\text{C}.$$

Anche la seconda grandezza di cui abbiamo bisogno dovrebbe esserti nota, ma con un nome diverso da quello usato in fisica. Si tratta di ciò che viene comunemente detto "quantità di calore" o semplicemente "calore". Per mostrare la differenza tra quantità di calore e temperatura, facciamo un semplice esperimento, fig. 10.1. In un bicchiere A c'è 1 l d'acqua a una temperatura di 80°C . Travasiamo metà dell'acqua in un recipiente vuoto B. Cosa succede alla temperatura e cosa alla quantità di calore? La temperatura dell'acqua dopo il travaso è la stessa in entrambi i recipienti A e B ed è anche la stessa che nel recipiente A prima del travaso. La quantità di calore invece, si è distribuita, con il travaso, nei recipienti A e B. Se all'inizio in A c'erano 10 unità di calore, alla fine ce ne sono 5 unità in A e 5 in B.

La temperatura caratterizza quindi l'essere caldo (oppure freddo) di un corpo, indipendentemente

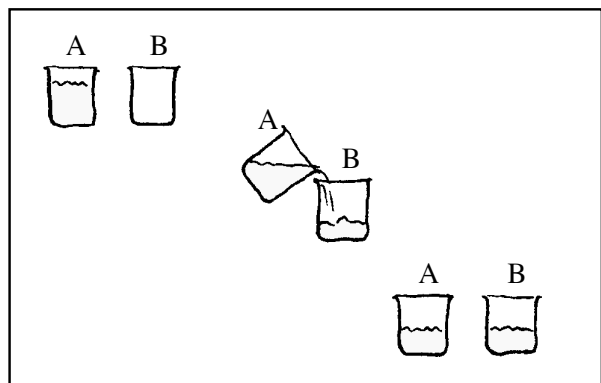


Fig. 10.1. Metà dell'acqua del bicchiere A viene versata nel bicchiere B.

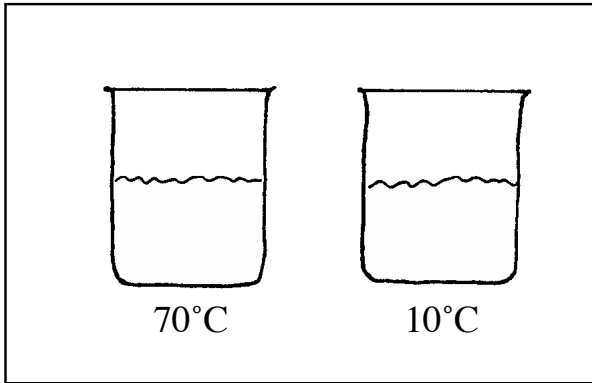


Fig. 10.2. L'acqua nel bicchiere a sinistra contiene più entropia di quella nel bicchiere a destra.

dalla sua grandezza. La quantità di calore, invece, è qualcosa di *contenuto* nel corpo.

Per ciò che viene comunemente chiamato quantità di calore, in fisica si usa un termine tecnico: è detta *entropia*, il simbolo per questa grandezza è S e la sua unità di misura il Carnot, abbreviato Ct. Quindi, se il contenuto di entropia di un corpo è di 20 Carnot, possiamo scrivere:

$$S = 20 \text{ Ct.}$$

L'unità di misura prende il nome dal fisico Sadi Carnot (1796 - 1832), il cui contributo alla scoperta dell'entropia è stato essenziale.

Quando studieremo le proprietà della grandezza entropia, dovrai solo ricordarti che si tratta di ciò che comunemente chiamiamo calore.

Confrontiamo i due bicchieri d'acqua in fig. 10.2. In entrambi c'è la stessa quantità d'acqua. L'acqua nel bicchiere a sinistra è calda, la sua temperatura è di 70°C , l'acqua nel bicchiere a destra è fresca, la sua temperatura è di 10°C . Quale bicchiere contiene più entropia? (In quale bicchiere c'è più calore?) Naturalmente quello a sinistra.

Più la temperatura di un corpo è alta, più entropia contiene.

Confrontiamo ora i bicchieri d'acqua in fig. 10.3. Qui le temperature sono uguali, ma la massa d'acqua non è la stessa a sinistra e a destra. Quale bicchiere contiene più entropia? Ancora quello a sinistra.

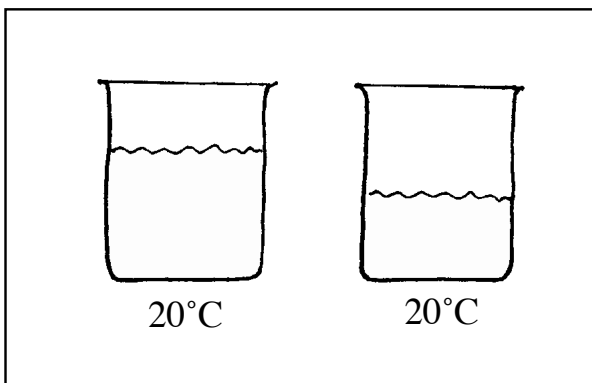


Fig. 10.3. L'acqua nel bicchiere a sinistra contiene più entropia di quella nel bicchiere a destra.

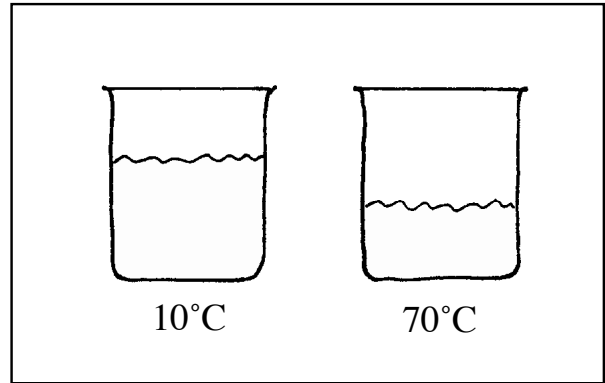


Fig. 10.4. In questo caso non è facile decidere in quale bicchiere ci sia più entropia.

Più la massa di un corpo è grande, più entropia contiene.

Quale dei bicchieri in fig. 10.4 contiene più entropia, è qualcosa che al momento non può ancora essere stabilito.

Consideriamo nuovamente un esperimento come quello di fig. 10.1. Nel bicchiere A c'è 1 l d'acqua con una quantità di entropia di 4000 Ct. Travasiamo $1/4$ dell'acqua, cioè 250 ml, nel bicchiere vuoto B. Quanta entropia c'è in A dopo il travaso e quanta in B? Con il travaso l'entropia è stata distribuita nelle stesse proporzioni della quantità d'acqua. Quindi, 1000 Ct sono finiti nel bicchiere B, 3000 Ct sono rimasti in A.

Come possiamo immaginarci 1 Carnot? Si tratta di molta o poca entropia? Sai che per fondere il ghiaccio ci vuole "calore", vale a dire entropia. 1 Carnot è la quantità di entropia necessaria per fondere $0,893 \text{ cm}^3$ di ghiaccio. Quindi, come regola empirica:

1 Carnot fonde circa 1 cm^3 di ghiaccio.

Esercizi

1. In un locale A di 75 m^3 di volume, l'aria ha una temperatura di 25°C . In un altro locale B di 60 m^3 di volume, la temperatura dell'aria è di 18°C . Quale locale contiene più entropia?

2. Il caffè in una caffettiera piena contiene una quantità di entropia di 3900 Ct. Il caffè viene versato in tre tazze, la stessa quantità in ogni tazza. La caffettiera resta mezza piena. Quanta entropia c'è nella caffettiera dopo aver versato? Quanta ce n'è in ogni tazza?

10.2 La differenza di temperatura come spinta di una corrente di entropia

Teniamo un recipiente A contenente acqua calda, in un recipiente B contenente acqua fredda, fig. 10.5. Vogliamo osservare cosa succede e poi spiegare l'osservazione.

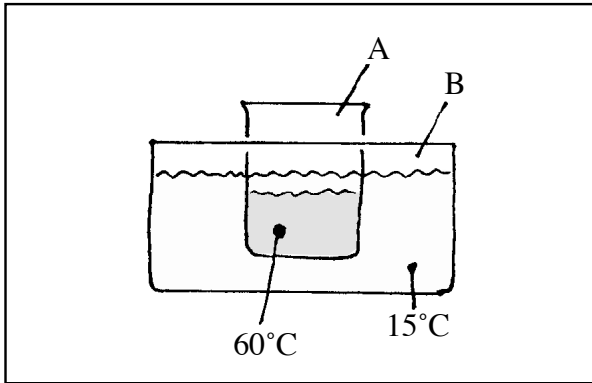


Fig. 10.5. Dal contenitore interno A al contenitore esterno B, fluisce entropia.

Prima l'osservazione: la temperatura dell'acqua in A scende, quella dell'acqua in B sale. Le temperature si avvicinano l'una all'altra e alla fine si uguagliano. La temperatura di B però, non supera quella di A.

E la spiegazione: da A a B scorre entropia fintantoché le temperature sono diventate uguali.

Possiamo ripetere l'esperimento con altri recipienti, figg. 10.6a e b. Ogni volta le temperature assumono lo stesso valore. Nel caso della fig. 10.6a, la temperatura finale è vicina alla temperatura iniziale di B, in fig. 10.6b è vicina alla temperatura iniziale di A. Comune a tutte le situazioni, è che alla fine si ha:

$$\vartheta_A = \vartheta_B.$$

Naturalmente si può anche iniziare con il recipiente interno A a una temperatura più bassa e il recipiente esterno B a una temperatura più alta. Anche in questo caso, le temperature si avvicinano l'una all'altra e infine assumono lo stesso valore. Concludiamo che:

L'entropia fluisce spontaneamente da punti a temperatura più alta verso punti a temperatura più bassa.

Sicuramente questa frase ti ricorda qualcosa. Se sfogli in avanti ne troverai due varianti. (E le incontreremo più avanti ancora.) Quindi, possiamo interpretare una differenza di temperatura $\vartheta_A - \vartheta_B$, come spinta per una corrente di entropia

Una differenza di temperatura è la spinta per una corrente di entropia.

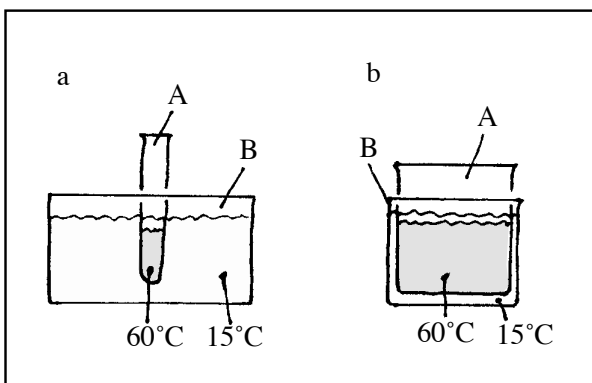


Fig. 10.6. In entrambi i casi l'entropia scorre dal contenitore interno a quello esterno.

Adesso è facile capire perché negli esperimenti delle figg. 10.5 e 10.6 l'entropia alla fine smette di scorrere: appena le temperature diventano uguali, scompare la spinta per la corrente di entropia.

Lo stato di uguaglianza delle temperature che si instaura alla fine, viene detto *equilibrio termico*.

Davanti a te c'è una tazza di tè. Il tè è ancora troppo caldo per essere bevuto. Quindi, aspetti che si raffreddi. Cosa gli succede esattamente nel raffreddarsi? Visto che all'inizio la temperatura del tè è più alta di quella dell'aria e di quella del tavolo, una corrente di entropia fluisce dal tè all'ambiente circostante. In questo modo, l'ambiente diventa più caldo? A essere molto precisi: sì. Però l'entropia proveniente dal tè si distribuisce così lontano e si diluisce così tanto, che alla fine praticamente non la si nota.

Tocchiamo diversi oggetti in giro per l'aula. Alcuni sono freddi al tatto: il metallo dei banchi, i pilastri in cemento. Altri sembrerebbero meno freddi, p. es. il legno dei banchi. Altri ancora sono quasi piacevolmente caldi: un guanto di lana o un pezzo di polistirolo. La temperatura di un oggetto di ferro, sembra quindi essere inferiore a quella di un oggetto di legno. Questa constatazione dovrebbe darti da pensare. Abbiamo appena detto: "l'entropia fluisce spontaneamente da punti a temperatura più alta verso punti a temperatura più bassa." Di conseguenza, dalle parti in legno verso le parti in ferro del banco, dovrebbe scorrere entropia in continuazione. In questo modo il ferro diventerebbe più caldo e il legno più freddo, fino a quando...? Fino a quando le temperature sono uguali.

Prima di speculare oltre, determiniamo la temperatura di vari oggetti presenti in aula, con un apparecchio per misurare la temperatura, così da non dover fare affidamento alle nostre sensazioni. Il risultato è sorprendente. Tutte le temperature sono uguali. Ferro, legno e polistirolo hanno tutti la stessa temperatura, a condizione che gli oggetti siano rimasti nel locale abbastanza a lungo da aver uguagliato le loro temperature.

Solo in inverno gli oggetti posti più in alto nel locale sono a una temperatura un po' più alta di quelli in basso. Questo perché il riscaldamento riscalda l'aria che poi sale. L'instaurarsi dell'equilibrio termico viene costantemente disturbato dal riscaldamento. D'estate, invece, di solito c'è un buon equilibrio. Possiamo trarre la prima conclusione: la nostra sensazione di "caldo" e "freddo" ci ha ingannati. In uno dei prossimi paragrafi scoprirai la causa di questo inganno e il perché in effetti non è un inganno.

Esercizi

1. (a) Quando si cucina, dalla piastra alla pentola fluisce entropia. Perché? (b) La pentola viene messa sul tavolo appoggiata su un sottopentola. Perché c'è entropia che fluisce dalla pentola al sottopentola? (c) Una bottiglia di bevanda gassata viene tolta dal frigorifero e messa sul tavolo. Nel punto dove è appoggiata la bottiglia, il tavolo si raffredda. Perché?

2. Un grande blocco A di metallo, ha una temperatura di 120 °C, un piccolo blocco B dello stesso metallo, ha una temperatura di 10 °C. I blocchi vengono messi in contatto in modo che dall'uno all'altro possa fluire entropia. Da quale a quale fluirà? La temperatura finale è più vicina a 120 °C o a 10 °C?

3. Davanti a te vedi un piccolo blocco di metallo caldo e uno più grande e più freddo. (a) Puoi stabilire quale dei due contiene più entropia? (b) Poni in contatto i due blocchi. Cosa succede a temperatura e entropia? (c) Alla fine, quale blocco contiene più entropia?

10.3 La pompa di calore

Il fatto che l'entropia scorra spontaneamente dagli oggetti a temperatura più alta agli oggetti a temperatura più bassa, non significa che non possa in nessun caso fluire in direzione opposta, cioè dal freddo al caldo. Può farlo - però appunto non "spontaneamente". Perché lo faccia si deve "usare violenza": ci vuole una pompa per l'entropia. Il nome adottato per un apparecchio del genere è *pompa di calore*.

Oggi giorno, chiunque ha in casa una pompa di calore: è una parte del frigorifero e serve a convogliare l'entropia dall'interno all'esterno del frigorifero. Prima di studiare più a fondo il frigorifero, dobbiamo imparare alcune cose essenziali sulle pompe di calore.

Come ogni altra pompa, anche una pompa di calore ha due allacciamenti per ciò che dev'essere pompato: un'entrata e un'uscita. Una pompa idraulica ha un'entrata e un'uscita per l'acqua, una pompa di quantità di moto ha un'entrata e un'uscita per la quantità di moto. Analogamente, una pompa di calore ha un'entrata e un'uscita per l'entropia, fig. 10.7. Sia l'entrata che l'uscita consistono in una serpentina, dentro la quale scorre un liquido o un gas. È in questo modo che l'entropia è trasportata dentro e fuori dalla pompa.

Una pompa di calore trasporta entropia da punti a temperatura bassa verso punti a temperatura alta.

Raffreddare un oggetto significa sottrargli entropia;

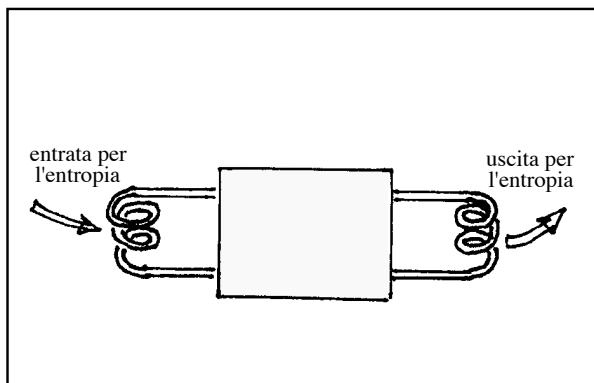


Fig. 10.7. La pompa di calore ha un'entrata e un'uscita per l'entropia.

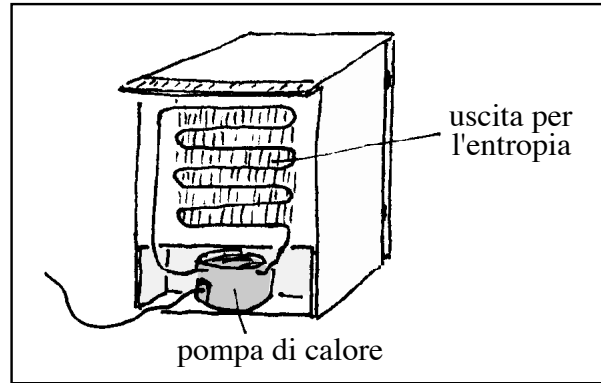


Fig. 10.8. Retro di un frigorifero. Si vedono la pompa di calore e la serpentina dalla quale l'entropia lascia dal frigorifero.

riscaldare un oggetto significa fornirgli entropia. Guardando la fig. 10.7, possiamo immaginare che una pompa di calore possa essere usata sia per raffreddare che per riscaldare. Effettivamente, le pompe di calore sono utili a entrambi gli scopi.

Esaminiamo più da vicino il frigorifero, fig. 10.8. La pompa di calore è posta in basso, nella parte posteriore del frigorifero. Visto da dietro, si nota facilmente anche l'uscita per l'entropia: una serpentina che copre gran parte della parte posteriore del frigorifero. Per facilitare il passaggio dell'entropia nell'aria, tra i tubi c'è una griglia metallica. Che l'entropia esca dal frigorifero in questo punto, si deduce dal fatto che la serpentina è calda quando il frigorifero è in funzione. L'entrata dell'entropia è all'interno del frigorifero: una serpentina inserita nella parete del vano di surgelazione.

Alcune case sono riscaldate con una pompa di calore. In questo caso l'entropia viene presa dall'aria all'esterno, oppure, se c'è, da un ruscello o da un fiume che scorre nei paraggi. Anche l'acqua di alcune piscine è riscaldata in questa maniera.

La pompa di calore è utilizzata anche in un altro apparecchio, il climatizzatore. Un climatizzatore regola la temperatura e l'umidità dell'aria all'interno di un edificio. A questo scopo, deve anche essere in grado di raffreddare l'aria nell'edificio e lo fa con una pompa di calore. La fig. 10.9 mostra climatizzatore semplice, capace solo di raffreddare l'aria all'interno del locale.

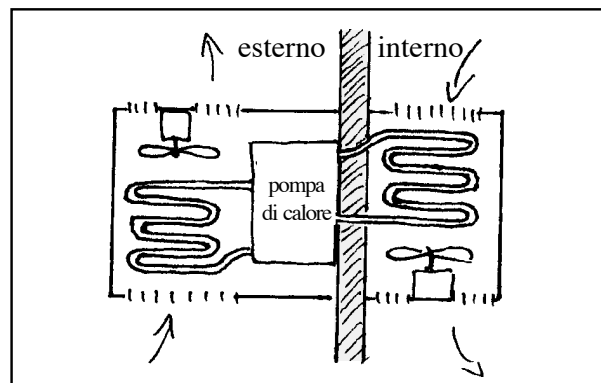


Fig. 10.9. Climatizzatore semplice. I due ventilatori servono a migliorare lo scambio di calore con l'aria.

Esercizi

1. Esamina il frigorifero di casa tua. Cerca la pompa di calore, l'entrata e l'uscita per l'entropia. Tieni premuta una mano sulla serpentina dell'uscita per l'entropia.
2. Cosa succede all'entropia se lasciamo aperta a lungo la porta del frigorifero?

10.4 La temperatura assoluta

Quanta entropia possiamo estrarre da un oggetto?
Quanta entropia contiene?

Innanzitutto dobbiamo renderci conto che si tratta di due domande diverse.

Se c'è solo entropia positiva, allora da un oggetto non possiamo estrarre più entropia di quanta ne contenga. Esattamente come da un recipiente non possiamo pompare più aria di quanta ne contiene.

Sarebbe diverso se ci fosse anche l'entropia negativa. In quel caso potremmo estrarre entropia da un oggetto anche se il suo contenuto di entropia fosse di zero Carnot: se p. es. togliessimo 5 Carnot, il contenuto di entropia diventerebbe appunto di meno 5 Carnot. Che una cosa del genere sia possibile, lo sappiamo dalla quantità di moto: anche da un corpo fermo, cioè un corpo con la quantità di moto zero Huygens, si può estrarre quantità di moto; la sua quantità di moto diventa negativa.

Sosituiamo quindi le due domande poste all'inizio con un'altra domanda: c'è entropia negativa? (Nel qual caso, forse, potremmo dire che l'entropia negativa è ciò che comunemente viene detto "freddo" o "quantità di freddo").

In linea di massima è facile dare una risposta a questa domanda. Tutto ciò di cui abbiamo bisogno è di un'ottima pompa di calore. Prendiamo un oggetto qualsiasi, per esempio un mattone, ed estraiamo entropia fin quando è possibile. Cominciamo provando con il frigorifero: la temperatura del mattone scenderà forse fino a $-5\text{ }^\circ\text{C}$. Non scende oltre perché la pompa di calore del frigorifero non riesce a fare meglio. Possiamo togliere più entropia al mattone, se lo mettiamo nel congelatore: la temperatura scende fino a circa $-18\text{ }^\circ\text{C}$. Ci sono anche pompe di calore migliori (e naturalmente più costose) che permettono di raggiungere temperature più basse. Queste pompe di calore sono dette macchine del freddo. Esistono macchine del freddo che potrebbero raffreddare il nostro mattone fino a $-200\text{ }^\circ\text{C}$. A questa temperatura l'aria è già liquida. Infatti, macchine di questo tipo sono utilizzate anche per la liquefazione dell'aria. E ci sono macchine del freddo con cui si può estrarre ancora più entropia dal nostro mattone. Lo si capisce dal fatto che la temperatura scende ulteriormente. Così si raggiungono i $-250\text{ }^\circ\text{C}$, poi i $-260\text{ }^\circ\text{C}$, e con dispendio ancora maggiore i $-270\text{ }^\circ\text{C}$, $-271\text{ }^\circ\text{C}$, $-272\text{ }^\circ\text{C}$, $-273\text{ }^\circ\text{C}$. A $-273,15\text{ }^\circ\text{C}$ smette.

Malgrado gli sforzi e l'uso di ogni mezzo a disposizione, non si riesce a scendere oltre.

La spiegazione è semplice:

- 1) A quella temperatura il nostro mattone non contiene più entropia.
- 2) L'entropia non può assumere valori negativi.

La temperatura più bassa che un oggetto può avere, è $-273,15\text{ }^\circ\text{C}$. A questa temperatura non contiene più entropia.

Quando $\theta = -273,15\text{ }^\circ\text{C}$, $S = 0\text{ Ct}$.

Dopo aver scoperto che esiste una temperatura minima, sembrò ragionevole introdurre una nuova scala di temperatura. Questa nuova *scala della temperatura assoluta* è solamente sfasata rispetto alla scala Celsius, in modo che il suo zero corrisponda a $-273,15\text{ }^\circ\text{C}$. Il simbolo per la temperatura assoluta è T , l'unità di misura il Kelvin, abbreviato K. La fig. 10.10 mostra la relazione tra le due scale. Tieni presente che una differenza di temperatura di $1\text{ }^\circ\text{C}$ è equivalente a una differenza di temperatura di 1 K.

Sulla scala Celsius la temperatura di ebollizione dell'acqua è:

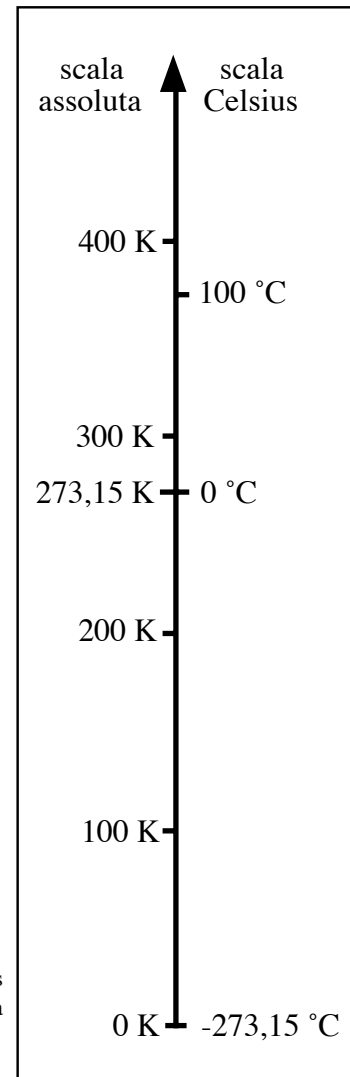


Fig. 10.10 Scala Celsius e scala della temperatura assoluta

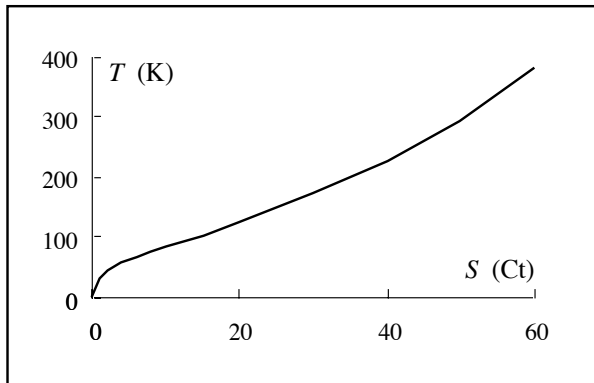


Fig. 10.11. Temperatura in funzione del contenuto di entropia, per 100 g di rame.

$$\vartheta = 100 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

e sulla scala assoluta

$$T = 373,15 \text{ K.}$$

Lo zero della scala della temperatura assoluta è a $-273,15 \text{ }^{\circ}\text{C}$. L'unità di misura della temperatura assoluta è il Kelvin.

La fig. 10.11 mostra la relazione tra contenuto di entropia e temperatura per un pezzo di rame di 100 g.

Esercizi

- Trasforma le seguenti temperature Celsius in temperature assolute:
 $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (temperatura di fusione dell'acqua)
 $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (temperatura normale)
 $100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (temperatura di ebollizione dell'acqua)
 $-183 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (temperatura di ebollizione dell'ossigeno)
 $-195,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (temperatura di ebollizione dell'azoto)
 $-268,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (temperatura di ebollizione dell'elio)
 $-273,15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (zero assoluto)
- Trasforma le seguenti temperature assolute in temperature Celsius:
 $13,95 \text{ K}$ (temperatura di fusione dell'idrogeno)
 $20,35 \text{ K}$ (temperatura di ebollizione dell'idrogeno)
 $54,35 \text{ K}$ (temperatura di fusione dell'ossigeno)
 $63,15 \text{ K}$ (temperatura di fusione dell'azoto)
- Quanta entropia è contenuta in 1 kg di rame a una temperatura di $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$? Per rispondere alla domanda, utilizza la fig. 10.11.

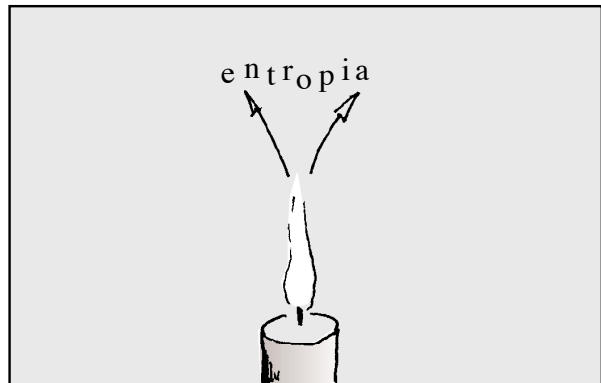


Fig. 10.12. Nella fiamma viene prodotta entropia

10.5 Produzione di entropia

Per riscaldare un locale si può usare una pompa di calore: prendiamo entropia dall'esterno e la trasportiamo nella casa. In realtà però, la maggior parte degli impianti di riscaldamento funziona in altro modo: bruciando un combustibile: olio combustibile, carbone, legna o un gas combustibile. La combustione è una reazione chimica che trasforma combustibile e ossigeno, in altre sostanze, solitamente anidride carbonica e acqua (in forma gassosa). Ma da dove viene l'entropia ceduta dalle fiamme durante la combustione? Non era contenuta nel combustibile, nè nell'ossigeno, in quanto entrambe le sostanze prima erano fredde. Evidentemente appare durante la combustione. *Nella fiamma viene prodotta entropia*, fig. 10.13.

Un altro tipo di riscaldamento è il riscaldamento elettrico. Attraverso un filo sottile viene spedita una corrente elettrica intensa. Il filo si riscalda. *Nel filo viene prodotta entropia*, fig. 10.13.

Molte apparecchiature elettriche funzionano secondo questo principio: la piastra di cottura, il ferro da stiro, il riscaldatore a immersione, il radiatore ad accumulazione, il riscaldamento dell'asciugacapelli, la lampada a incandescenza.

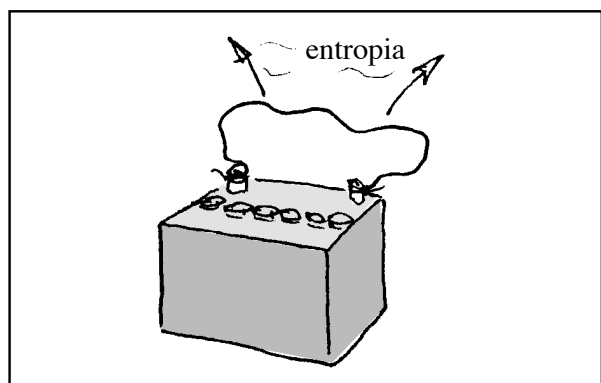


Fig. 10.13. Il filo è attraversato da una corrente elettrica. In questo modo viene prodotta entropia.

Conosci già un terzo modo di produrre entropia: con l'attrito meccanico. Se ti lasci scivolare troppo velocemente da una pertica, puoi renderti conto in modo spiacevole della formazione di entropia. Lo si nota anche trapanando con un trapano spuntato o segando con una sega non affilata. *Nella superficie di contatto tra gli oggetti che si sfregano, viene prodotta entropia.*

In tutti questi processi, l'entropia è veramente prodotta dal nulla, non viene presa da una qualche altra parte.

L'entropia può essere prodotta

- in una reazione chimica (p. es. combustione);
- in un filo attraversato da una corrente elettrica;
- con attrito meccanico.

Tra l'altro, tutti questi processi possono essere interpretati come una forma di attrito. Ogniqualevolta qualcosa fluisce attraverso un collegamento o in un conduttore che oppone una resistenza al passaggio della corrente, si manifesta un "attrito". Nel caso dell'attrito meccanico è la quantità di moto che fluisce da un corpo a un altro attraverso un collegamento che conduce male la quantità di moto. Negli apparecchi elettrici che servono a riscaldare, un filo che le oppone resistenza è attraversato da una corrente elettrica. E anche in una reazione chimica si deve vincere una specie di attrito, la cosiddetta resistenza di reazione.

Abbiamo discusso il problema di come procurarci l'entropia necessaria per riscaldare un locale o un oggetto. Occupiamoci ora del problema inverso: dobbiamo raffreddare un oggetto. Conosciamo già un metodo per farlo: possiamo estrarre entropia dall'oggetto con una pompa di calore.

Un secondo metodo funziona solo a condizione che l'oggetto sia più caldo dell'ambiente circostante (che la sua temperatura sia più alta). Cosa facciamo quando il tè scotta? Aspettiamo. L'entropia defluisce spontaneamente nell'ambiente circostante.

In entrambi i casi, con e senza pompa di calore, l'entropia che scompare dall'oggetto da raffreddare riappare da qualche altra parte. Non si potrebbe far sparire definitivamente questa entropia? Non si potrebbe farla sparire senza che riappaia in un altro posto? Non la si potrebbe *annientare*? Dopotutto abbiamo appena visto che la si può *produrre* dal nulla.

Molti inventori e molti scienziati ci hanno provato - senza successo. Oggigiorno si è fermamente convinti che l'entropia non si possa annientare.

L'entropia può essere prodotta ma non annientata.

Approfittiamo dell'occasione per ricordare altre due grandezze: l'energia e la quantità di moto. Entrambe non possono essere né prodotte né annientate, come peraltro avevamo sempre dato per scontato. Se in un punto qualsiasi la quantità di energia aumenta, deve diminuire da qualche altra parte, se in un punto qualsiasi diminuisce, da qualche parte deve aumentare. Lo stesso vale per la quantità di moto.

L'energia non può essere né prodotta, né annientata.

La quantità di moto non può essere né prodotta, né annientata.

La possibilità di produrre entropia pone delle questioni interessanti e ha delle conseguenze curiose.

Ecco il primo problema. L'entropia può essere prodotta, e viene effettivamente prodotta, in innumerevoli processi che si svolgono sulla Terra. Le combustioni sono una sorgente di entropia particolarmente redditizia. Tieni presente che la combustione non avviene solo nei forni, nelle caldaie e nei motori delle auto, ma in misura preponderante avviene in natura: in tutti gli esseri viventi, dai microbi ai mammiferi, avvengono in continuazione dei processi di ossidazione, cioè delle combustioni, che producono entropia. In queste condizioni, la quantità di entropia della Terra non dovrebbe diventare sempre più grande? La Terra non dovrebbe diventare sempre più calda? In realtà la temperatura della Terra, a parte piccole oscillazioni, è rimasta invariata per milioni di anni. La spiegazione: non è sufficiente prendere in considerazione solo la Terra. Innanzitutto la Terra riceve incessantemente entropia dal Sole con la luce. (Anche in questo caso l'entropia scorre dalla temperatura alta verso quella bassa: la temperatura sulla superficie del Sole è di circa 6000 K, sulla superficie della Terra circa 300 K.) Inoltre la Terra cede incessantemente entropia allo spazio. (Di nuovo l'entropia scorre dalla temperatura alta verso quella bassa: l'universo ha una temperatura di circa 3 K.) Anche l'entropia ceduta dalla Terra è portata dalla luce, ma da luce infrarossa non visibile. Questa luce infrarossa porta via esattamente l'entropia necessaria perché la temperatura della Terra rimanga pressoché costante. Resta la questione di sapere cosa succede all'universo se la sua entropia aumenta costantemente. Fino ad oggi questa domanda non ha ancora risposta. È comunque solo un piccolo problema se confrontato con le grandi questioni sulla struttura e l'evoluzione del cosmo.

Il fatto che si possa produrre ma non annientare entropia, ha un'altra conseguenza singolare. Qualcuno proietta un film (senza sonoro), senza però dirti se viene proiettato in avanti o indietro. Puoi capire in che direzione è proiettato il film? Il "film" in fig. 10.14, se proiettato normalmente, mostra una candela che brucia. Proiettato al contrario mostra qualcosa che non esiste nella realtà: una candela che

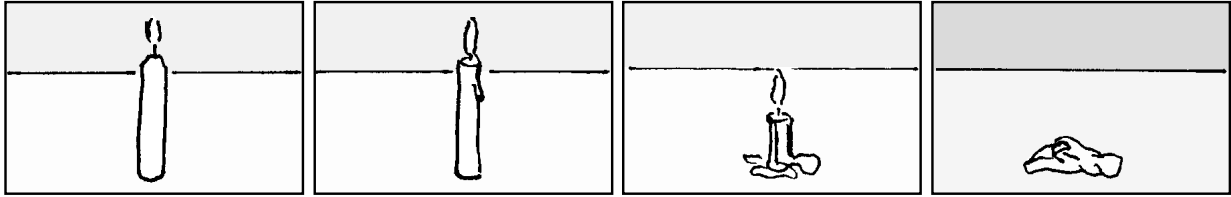


Fig. 10.14. Una candela che brucia è un processo irreversibile.

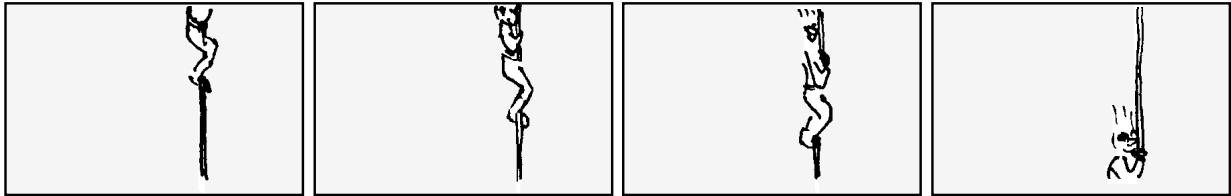


Fig. 10.15. Le immagini sono messe nella giusta sequenza?

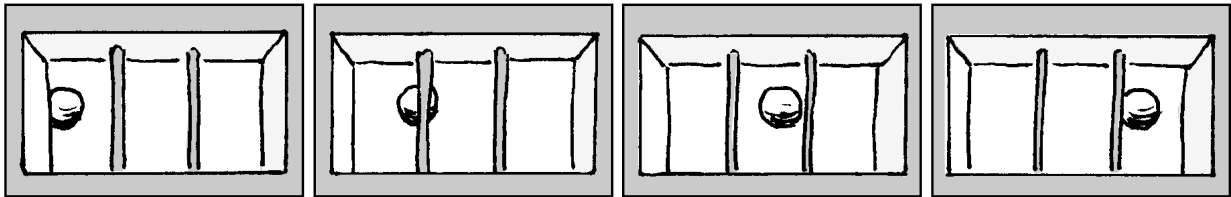


Fig. 10.16. Una palla passa davanti a una finestra. Il processo è reversibile.

diventa più grande. Il film, quindi, mostra un *processo irreversibile*. Perché il processo è irreversibile? Perché viene prodotta entropia. Un'inversione significherebbe che viene annientata entropia - e questo non può succedere.

Un altro processo irreversibile è mostrato in fig. 10.15: una persona scivola giù da una pertica. Anche questo processo è irreversibile perché viene prodotta entropia.

Ci sono però processi che possono svolgersi in entrambi i sensi: tutti quei processi dove non viene prodotta entropia. La fig. 10.16 mostra una palla lanciata davanti a una finestra. La palla è veramente andata da sinistra a destra come mostrato dal film? Oppure è andata nell'altra direzione e il film è proiettato al contrario?

I processi nei quali viene prodotta entropia sono irreversibili.

Esercizi

1. Una lampada è allacciata a una batteria. La lampada è accesa e la batteria lentamente si svuota. Descrivi il processo inverso. (Supponi che sia possibile annientare entropia.)
2. Descrivi nei particolari quali processi si manifesterebbero se il processo "automobile in corsa" si svolgesse al contrario e se non fosse vietato annientare entropia.
3. Un ciclista frena. Descrivi nei particolari cosa succederebbe se il processo si svolgesse al contrario. (Supponi che l'entropia si possa annientare.)

10.6 L'intensità della corrente di entropia

L'estremità sinistra della sbarra metallica in fig. 10.17 viene riscaldata, quella destra raffreddata. In altre parole: a sinistra viene fornita entropia alla sbarra, a destra le viene tolta entropia. Nella sbarra, l'entropia scorre da sinistra a destra, dalla temperatura alta a quella bassa. Diciamo che fluisce un *corrente di entropia*. Il numero di Carnot che scorrono attraverso la sbarra ogni secondo, ci dà l'*intensità della corrente di entropia*:

$$\text{Intensità della corrente di entropia} = \frac{\text{entropia}}{\text{intervallo di tempo}}$$

Per l'intensità della corrente di entropia utilizziamo il simbolo I_S . Così possiamo scrivere:

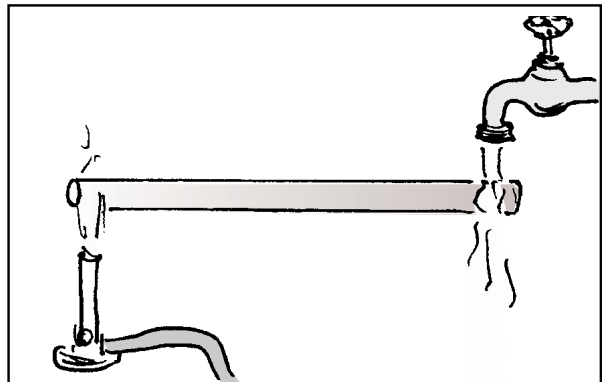


Fig. 10.17. Nelle sbarra fluisce una corrente di entropia dall'estremità calda a quella fredda.

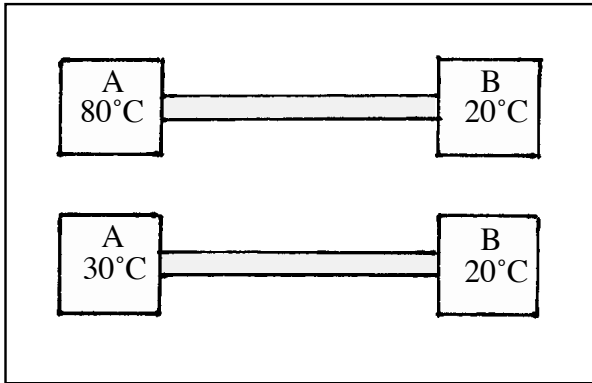


Fig. 10.18. Nel dispositivo in alto, la differenza di temperatura tra i corpi A e B è maggiore.

$$I_s = \frac{S}{t}$$

L'unità di misura dell'intensità della corrente di entropia, è il Carnot al secondo, abbreviato Ct/s.

Da cosa dipende l'intensità della corrente di entropia tra i punti A e B? Diamo un'occhiata alla fig. 10.18. Nell'esempio in alto, la differenza di temperatura tra i corpi A e B è maggiore di quella in basso. Per il resto, sopra e sotto è tutto uguale. Visto che nell'esempio in alto la spinta per la corrente di entropia è più grande, anche l'intensità della corrente è maggiore.

Più la differenza di temperatura tra due punti è grande (più la spinta è grande), più sarà intensa la corrente di entropia che fluisce da un punto all'altro.

10.7 La resistenza termica

La corrente di entropia può avere intensità diverse anche con la stessa differenza di temperatura. Infatti, non dipende solo dalla differenza di temperatura, ma anche dal tipo di collegamento, dalla *resistenza termica* del collegamento, fig. 10.19. Ma da cosa dipende la resistenza termica del collegamento?

La fig. 10.20 mostra due conduttori di entropia a e b, le cui estremità hanno la stessa differenza di tempe-

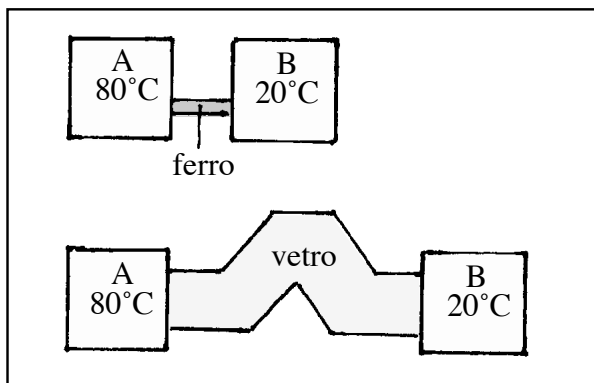


Fig. 10.19. Collegamenti con diverse resistenze termiche.

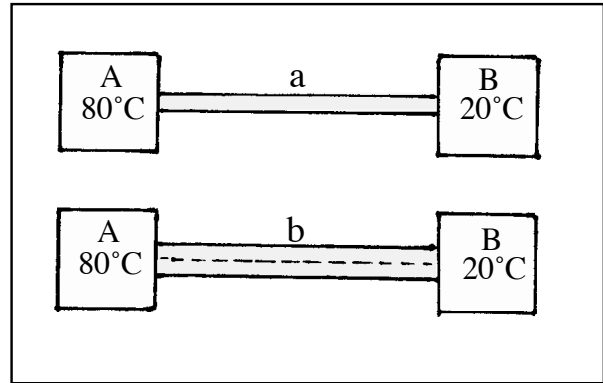


Fig. 10.20. Attraverso il conduttore più spesso, fluisce una corrente di entropia più intensa.

ratura, cioè 60 K. La sezione del conduttore b è però doppia di quella del conduttore a. Ora, in ogni metà del conduttore b (quella superiore e quella inferiore) scorre tanta entropia quanta ne scorre nel conduttore a, complessivamente, quindi, ne scorre il doppio che nel conduttore a.

La fig. 10.21 mostra altri due conduttori a e b, con b lungo il doppio di a. Confrontiamo una delle due metà di b, p. es. la metà sinistra, con il conduttore a. Sono fatti allo stesso modo, ma ai capi di a c'è una differenza di temperatura maggiore che ai capi della metà di b. Di conseguenza, attraverso questo pezzo di b scorre una corrente di entropia più debole che attraverso a. Quindi anche attraverso l'altro pezzo di b scorre una corrente di entropia più debole.

Infine, la fig. 10.22 mostra due conduttori della stessa lunghezza, della stessa sezione e con la stessa differenza di temperatura tra le estremità. Malgrado ciò la corrente che scorre in b ha un'intensità minore di quella che scorre in a, perché b è di legno, mentre a è di rame.

Ogni conduttore oppone resistenza a una corrente di entropia che lo attraversa. La resistenza è maggiore tanto più lungo è il conduttore e tanto più piccola la sua sezione. Inoltre, dipende dal materiale del conduttore.

In fig. 10.23 sono riassunte le dipendenze dell'intensità della corrente di entropia e della resistenza termica.

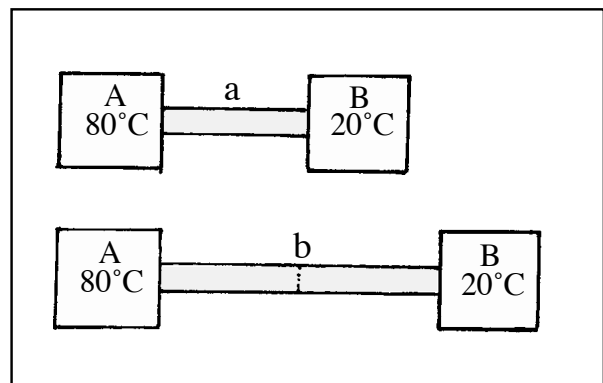


Fig. 10.21. Attraverso un conduttore più corto, fluisce una corrente di entropia più intensa.

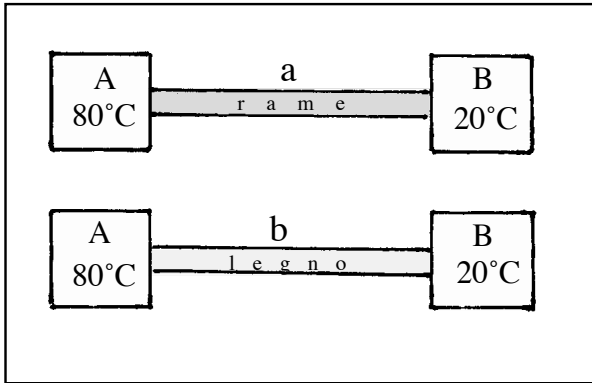


Fig. 10.22. Attraverso il conduttore di rame, fluisce una corrente di entropia più intensa che attraverso quello di legno.

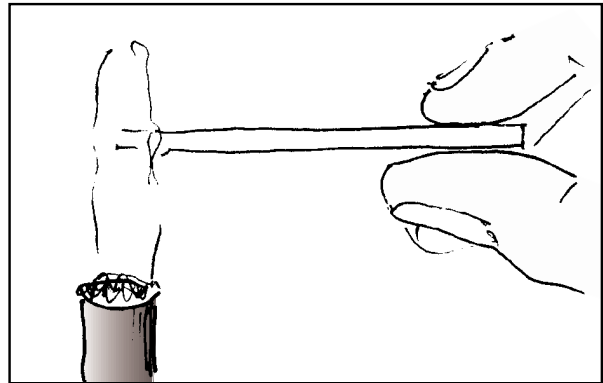


Fig. 10.24. A dipendenza della resistenza termica della sbarretta, l'estremità destra si riscalda più o meno rapidamente.

Esaminiamo alcuni materiali per scoprire se hanno una resistenza termica bassa o alta, se sono dei buoni o dei cattivi conduttori termici. Prendiamo tra le dita un'estremità di una piccola sbarra rigida fatta di un determinato materiale e teniamo l'altra estremità in una fiamma, fig. 10.24. A dipendenza della resistenza termica del materiale, le nostre dita sentiranno più o meno in fretta che la sbarra diventa calda.

Constatamo che legno, vetro e plastica, hanno una resistenza termica particolarmente alta. I metalli, per contro, hanno una piccola resistenza termica, sono dei buoni conduttori termici. L'aria e altri gas hanno una resistenza termica molto elevata. Questo spiega l'ampio uso di materiali che contengono molta aria nell'isolazione termica degli edifici: mattoni forati, blocchi di calcestruzzo poroso, materie plastiche espanse e fibre isolanti. Ma anche un maglione di lana tiene così caldo perché contiene molte cavità (piene d'aria).

Adesso possiamo spiegare come mai un oggetto metallico è più freddo al tatto di uno di legno.

Innanzitutto dobbiamo constatare che l'affermazione è valida solo per le basse temperature. Immergiamo in acqua bollente un pezzo di legno e un pezzo di metallo per portarli a una temperatura di 100 °C. Togliamo gli oggetti dall'acqua e li tocchiamo con un dito. Questa volta l'oggetto metallico sembra più caldo di quello in legno. Come si può spiegare?

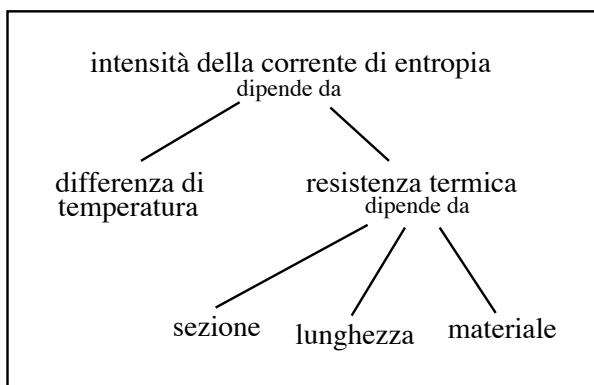


Fig. 10.23. Relazione tra intensità della corrente, differenza di temperatura e caratteristiche del conduttore.

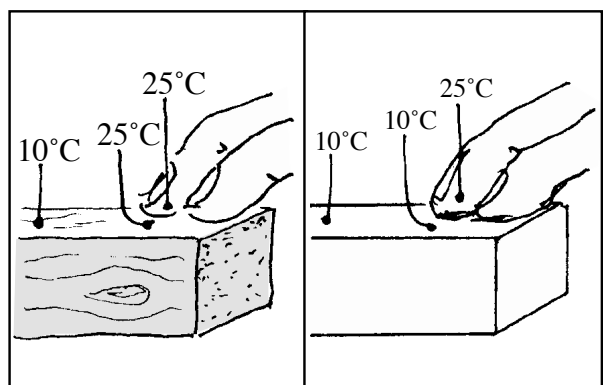


Fig. 10.25. Prima del contatto gli oggetti hanno la stessa temperatura, dopo non più.

Se tocchiamo un pezzo di legno o di metallo, entrambi alla temperatura di 10 °C, con il nostro dito a 25 °C, inizialmente scorre entropia dal dito all'oggetto, fig. 10.25. Il legno, nel punto di contatto si riscalda velocemente, assume la temperatura del dito, visto che l'entropia non scorre oltre. Nel metallo invece l'entropia scorre via dal punto di contatto verso l'interno dell'oggetto e il punto di contatto si riscalda solo di poco.

Toccano un oggetto che conduce male l'entropia, non sentiamo quindi la temperatura dell'oggetto prima che lo tocchiamo, ma la temperatura che l'oggetto assume in seguito al contatto.

Esercizi

1. Come si deve costruire una casa affinché le perdite di calore (perdite di entropia) siano minime?
2. L'entropia contenuta nell'acqua del calorifero di un impianto di riscaldamento centrale deve raggiungere l'esterno il più facilmente possibile. In che modo viene facilitata? Cita altri oggetti nei quali si cerca di avere una buona conducibilità termica.

10.8 Trasporto di entropia per convezione

Una differenza di temperatura è la spinta per una corrente di entropia. Se vogliamo portare entropia da A a B, basta fare in modo che A abbia una temperatura più alta di B. Un trasporto di entropia del genere è detto *conduzione termica*. In un certo senso, è il modo normale per portare entropia da A a B.

Se osserviamo con attenzione l'ambiente, ci possiamo rendere conto che la maggior parte dei trasporti di entropia, in particolare quelli su lunghe distanze, non avvengono affatto in questo modo. C'è un altro metodo per trasmettere entropia, il *trasporto convettivo di entropia*, o *convezione*.

Riscaldiamo un liquido o un gas e poi trasportiamo questo liquido, rispettivamente gas, da A a B - per esempio con l'aiuto di una pompa. La sostanza si porta dietro anche la sua entropia. Non c'è bisogno di una differenza di temperatura come spinta; in compenso ci vuole una spinta per la corrente del liquido rispettivamente del gas.

Il riscaldamento centrale è un esempio di trasporto convettivo di entropia, fig. 10.26. Nella caldaia, solitamente in cantina, l'acqua viene riscaldata, per esempio bruciando olio combustibile. L'acqua calda è poi pompata attraverso le tubazioni fino ai caloriferi nei diversi locali della casa. Nei caloriferi rilascia una parte della sua entropia e poi ritorna alla caldaia attraverso le tubazioni.

I trasporti convettivi di entropia sono più facili da realizzare rispetto a quelli normali, cioè quelli spinti da una differenza di temperatura. Il motivo: non ci sono dei conduttori termici veramente buoni. Anche un conduttore termico relativamente buono come il rame, nei fatti si rivela un pessimo conduttore termico. Sarebbe ad esempio impossibile trasportare l'entropia dalla sala caldaia del riscaldamento centrale ai singoli locali di una casa, utilizzando delle sbarre di rame. Per contro, non è per niente difficile trasportare acqua o aria, assieme alla loro entropia, anche su lunghe distanze.

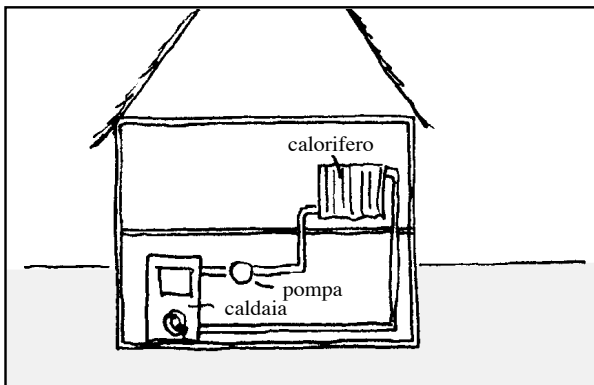


Fig. 10.26. Riscaldamento centrale. L'entropia giunge convettivamente dalla caldaia ai caloriferi.

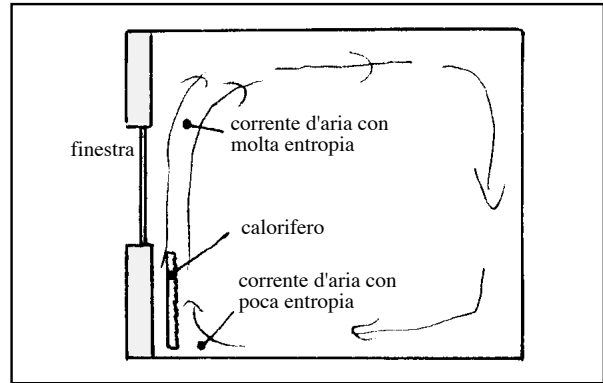


Fig. 10.27. L'entropia viene distribuita nel locale per convezione.

Trasporto convettivo di entropia: un liquido o un gas che scorre, porta con sé entropia. Per un trasporto convettivo di entropia non è necessaria una differenza di temperatura.

La natura e la tecnica forniscono molti esempi di trasporto convettivo di entropia.

In una camera riscaldata, l'entropia deve distribuirsi in tutto il locale dal calorifero o dalla stufa. Come può farlo, considerando che l'aria è un cattivo conduttore termico? Viene trasportata convettivamente con l'aria. In questo caso, tra l'altro, l'aria si muove senza pompa. Sopra il calorifero o la stufa, l'aria calda sale in quanto ha una densità minore dell'aria fredda, fig. 10.27.

Ogni motore d'automobile deve essere raffreddato, gli deve essere tolta entropia, fig. 10.28. La maggior parte dei motori è raffreddata a acqua: come nel riscaldamento centrale, l'entropia è trasportata con l'acqua dal motore al radiatore. La pompa dell'impianto di raffreddamento mantiene l'acqua in circolazione. Nel radiatore l'entropia è ceduta all'aria che vi soffia attraverso.

Anche tutti i grandi trasporti di entropia che avvengono in natura e che determinano le condizioni meteorologiche, sono trasporti convettivi. Nell'atmosfera, l'entropia è trasportata su grandi distanze assieme al vento, quindi all'aria in movimento.

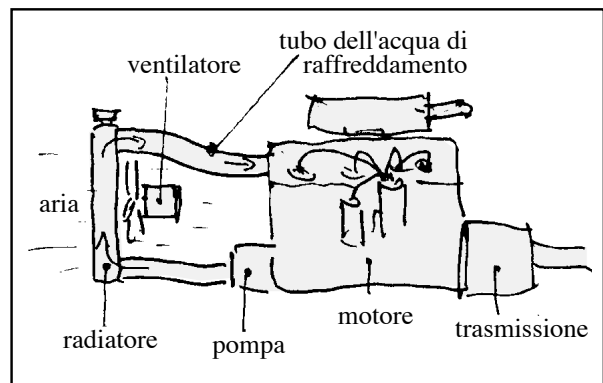


Fig. 10.28. Impianto di raffreddamento di un motore d'automobile. L'entropia va per convezione dal motore al radiatore.



Fig. 10.29. La corrente del Golfo. L'entropia viene trasportata dai Caraibi all'Europa con le correnti marine.

La corrente del Golfo è un altro esempio interessante di trasporto convettivo di entropia. Porta entropia dai Caraibi all'Europa, fig. 10.29. La conseguenza è che il clima europeo è più mite di quanto ci si aspetterebbe sulla base della sua latitudine.

Confrontiamo ancora una volta il trasporto di entropia attraverso un conduttore termico e mediante trasporto convettivo, seguendo il percorso dell'entropia in una casa con riscaldamento centrale. L'entropia prodotta dalle fiamme nella caldaia, raggiunge la parete esterna del serbatoio d'acqua in modo con-

vettivo. Attraversa la parete in modo normale, cioè spinta da una differenza di temperatura. Poi scorre convettivamente con l'acqua fino ai caloriferi. Attraversa le pareti del calorifero in modo normale e, dalla superficie esterna del calorifero, giunge infine convettivamente, assieme all'aria, in tutti i punti del locale. Possiamo notare che nel lungo tragitto dalla fiamma nella caldaia al locale da riscaldare, solo piccoli tratti di pochi millimetri vengono superati con la normale conduzione termica.

Tutti i trasporti di entropia su lunghe distanze sono convettivi.

Esercizi

1. Descrivi in quali modi una casa perde calore. Quali perdite sono dovute a conduzione e quali a convezione?
2. Descrivi il percorso dell'entropia dall'interno del motore di un'auto fino all'aria circostante. In quali tratti del percorso l'entropia fluisce a causa di una differenza di temperatura e in quali tratti convettivamente?
3. Come funziona il riscaldamento di un'automobile? Descrivi il percorso dell'entropia.

11. Entropia e energia

11.1 L'entropia come portatore di energia

Vogliamo stilare i bilanci per un riscaldamento elettrico. Parlando di riscaldamento elettrico intendiamo semplicemente un filo che diventa caldo perché attraversato da elettricità. Come già sai, ci sono molte applicazioni di un riscaldamento di questo tipo: piastra di cottura, ferro da stiro, lampada a incandescenza...

Da un lato sappiamo che nel riscaldamento viene prodotta entropia. Mentre è in funzione, il riscaldamento cede entropia. D'altro canto sappiamo che un riscaldamento "consuma" energia, cioè che dal cavo di alimentazione affluisce energia al riscaldamento. Il portatore dell'energia che affluisce, è l'elettricità.

Ma questa energia che entra incessantemente nell'apparecchio assieme all'elettricità, da qualche parte deve uscire di nuovo. E anche qui, come facciamo spesso, ci chiediamo: qual è il portatore di questa energia?

La risposta è ovvia: dal riscaldamento, con l'energia esce anche entropia e questa entropia è il portatore cercato. Possiamo generalizzare questa constatazione: sempre quando in un punto scorre una corrente di entropia, scorre anche una corrente di energia.

L'entropia è un portatore di energia.

Il riscaldamento elettrico fa parte di quegli apparecchi che abbiamo chiamato trasferitori di energia. L'energia entra nell'apparecchio con il portatore elettricità. Nell'apparecchio viene prodotta entropia e l'energia lascia l'apparecchio con l'entropia prodotta. Viene quindi trasferita dall'elettricità all'en-

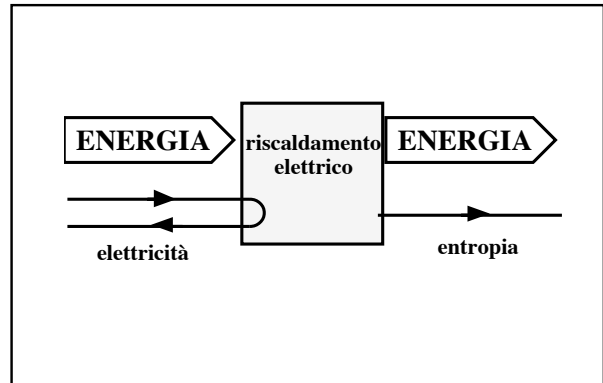


Fig. 11.2. Diagramma di flusso completo per un riscaldamento elettrico

tropia. Il nostro riscaldamento è rappresentato schematicamente in fig. 11.1.

Il diagramma di flusso è incompleto in un punto. Il portatore dell'energia in afflusso, l'elettricità, deve uscire di nuovo dall'apparecchio, visto che l'elettricità non può essere né prodotta né annientata. In fig. 11.2 l'elettricità oltre a un'entrata ha anche un'uscita. Nota che elettricità e energia hanno sia un'entrata che un'uscita, mentre l'entropia ha solo un'uscita. Possiamo formularlo in questo modo: nel riscaldamento elettrico l'energia è trasferita su entropia appena prodotta.

I risultati di questi ragionamenti possono essere applicati anche ad altri processi dove viene prodotta entropia. La fig. 11.3 mostra il diagramma di flusso di una stufa a olio. L'energia affluisce alla stufa con il portatore "olio combustibile + ossigeno". Mentre scaricano energia, l'olio combustibile e l'ossigeno si trasformano in gas di scarico (vapore acqueo e anidride carbonica). La combustione produce entropia e l'energia lascia la stufa con questa entropia.

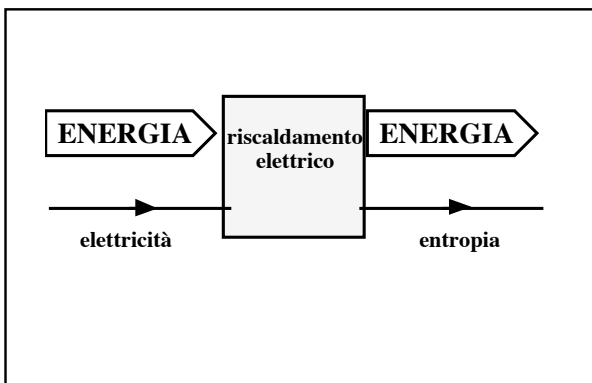


Fig. 11.1. Diagramma di flusso per un riscaldamento elettrico

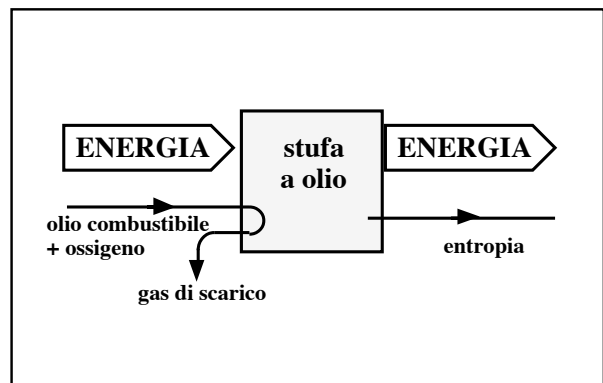


Fig. 11.3. Diagramma di flusso di una stufa a olio

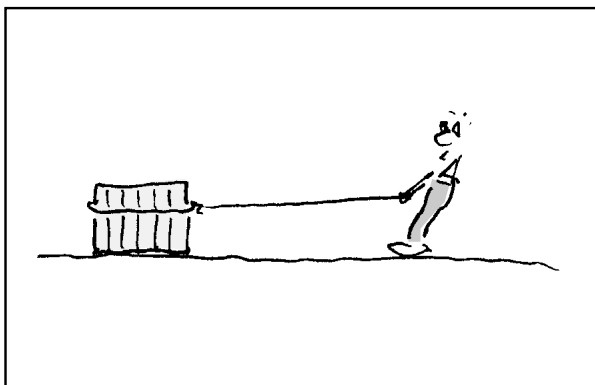


Fig. 11.4. Per l'esercizio 1. L'entropia viene prodotta alla superficie di contatto.

Esercizi

1. Disegna il diagramma di flusso per il processo d'attrito descritto in fig. 11.1. Suggerimento: il "trasferitore di energia" è la faccia inferiore della cassa.
2. Una torre di cubetti di legno crolla. In quale fase del processo è prodotta entropia? Da dove viene l'energia necessaria?

11.2 La relazione tra corrente di energia e corrente di entropia

Ogni corrente di entropia è accompagnata da una corrente di energia. Che relazione c'è tra le intensità di queste correnti? Una risposta parziale a questa domanda è facile da dare: una forte corrente di entropia sarà associata a una forte corrente di energia. Possiamo anche essere un po' più precisi: due correnti di entropia della stessa intensità, portano il doppio di energia di una corrente sola. Espresso matematicamente:

$$P \sim I_S \quad (1)$$

Naturalmente questa non è la relazione completa tra P e I_S . Per trovare la parte mancante esaminiamo ancora dei bilanci, ma questa volta per un apparecchio diverso dal riscaldamento elettrico. Per il nostro scopo è più adatta una pompa di calore elettrica.

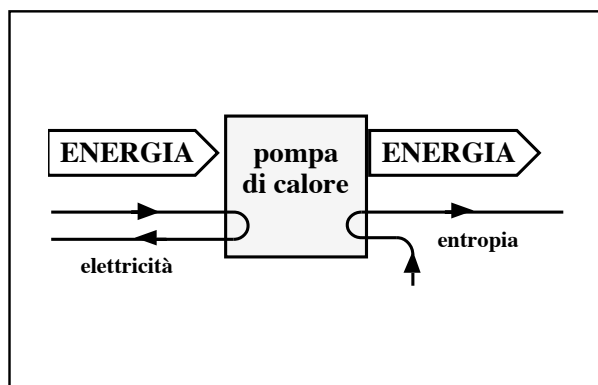


Fig. 11.5. Diagramma di flusso di una pompa di calore.

La fig. 11.5 mostra il diagramma di flusso per questo trasformatore di energia. Questa volta, per ogni corrente che defluisce ce n'è una della stessa intensità che affluisce, anche per la corrente di entropia. L'energia giunge ancora all'apparecchio con il portatore elettricità. L'elettricità lascia la pompa di calore dopo aver scaricato la sua energia. Dall'altra parte, l'entropia affluisce alla pompa di calore e viene caricata con l'energia portata dall'elettricità. Questa energia lascia la pompa di calore con l'entropia che defluisce.

Analizziamo più da vicino la parte destra del diagramma. La freccia dell'energia di destra rappresenta solo l'energia portata dall'elettricità. Si potrebbe rappresentare la parte destra del diagramma con più precisione, come in fig. 11.6. Anche l'entropia che affluisce alla pompa di calore porta energia. L'entropia che defluisce porta però più entropia di quella che affluisce, in quanto viene aggiunta quella portata dall'elettricità. La fig. 11.5 rappresenta quindi solo la "corrente netta di energia".

In fig. 11.6 possiamo notare come due correnti di entropia della stessa intensità, possano portare quantità diverse di energia. Quella che affluisce porta poca energia, quella che defluisce molta. Di conseguenza, l'intensità della corrente di energia non dipende solo dall'intensità della corrente di entropia.

Cos'ha di diverso l'entrata per l'entropia dall'uscita per l'entropia? La temperatura. L'intensità della corrente di energia deve dipendere anche dalla temperatura del conduttore attraverso il quale scorre l'entropia. Possiamo anche dire: la costante di proporzionalità che trasforma la relazione (1) in un'equazione, dipende dalla temperatura.

In effetti la costante di proporzionalità è semplicemente la temperatura assoluta:

$$P = T \cdot I_S \quad (2)$$

Un caso? Per niente. La scala di temperatura che tutti usiamo e con cui abbiamo già avuto a che fare così spesso è proprio definita dall'equazione (2).

Una corrente di entropia di intensità I_S , porta una corrente di energia di intensità $T \cdot I_S$.

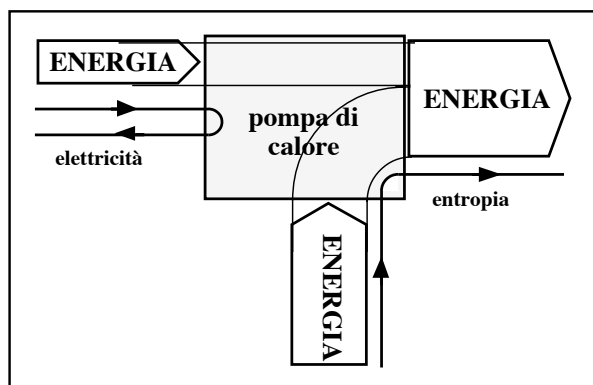


Fig. 11.6. Pompa di calore. Le correnti di energia che scorrono con l'entropia, sono raffigurate separatamente.

L'equazione (2) mostra che la temperatura può anche essere interpretata così:

La temperatura indica quanto una corrente di entropia sia caricata di energia.

Ora siamo in grado di stilare un bilancio energetico più preciso, quantitativo, della pompa di calore. Chiamiamo T_A la temperatura, alta, che ha l'entropia quando esce dalla macchina e T_B quella più bassa di quando entra. Con l'entropia a bassa temperatura, entra una corrente di energia di intensità

$$P_B = T_B \cdot I_S$$

Dall'uscita (ad alta temperatura) esce una corrente di energia di intensità

$$P_A = T_A \cdot I_S$$

L'intensità della corrente netta di energia è:

$$P = P_A - P_B = T_A I_S - T_B I_S$$

e quindi

$$P = (T_A - T_B) I_S \quad (3)$$

Questa corrente netta deve avere esattamente la stessa intensità della corrente di energia che affluisce alla pompa di calore attraverso il cavo di alimentazione. L'equazione (3) ci dà quindi il consumo di energia della pompa di calore. Interpretiamo così l'equazione (3):

La pompa di calore consuma più energia se

- deve trasportare più entropia

- la differenza di temperatura che deve superare è più grande.

Esempio: una pompa di calore che riscalda una casa trasporta 30 Ct al secondo dall'esterno all'interno della casa. La temperatura esterna è di 10 °C, la temperatura in casa 22 °C. Quant'è il consumo di energia della pompa?

Non dobbiamo nemmeno trasformare le temperature Celsius in temperature assolute, visto che le differenze di temperatura sono uguali su entrambe le scale. Quindi $T_A - T_B = 12$ K. Otteniamo:

$$P = (T_A - T_B) I_S = 12 \text{ K} \cdot 30 \text{ Ct/s} = 360 \text{ W.}$$

Ipotizziamo ora che la stessa casa venga riscaldata con un comune riscaldamento elettrico, cioè che l'entropia non venga pompata dall'esterno ma sia prodotta in casa. Naturalmente la temperatura in casa deve ancora essere di 22 °C e naturalmente in casa abbiamo ancora bisogno di 30 Ct/s, tanti quanti ne perde la casa attraverso le pareti. Calcoliamo con l'equazione (2) l'intensità della corrente di energia che esce dal riscaldamento elettrico, dove la temperatura è $T = (273 + 22)\text{K} = 295 \text{ K}$ e $I_S = 30 \text{ Ct/s}$:

$$P = T \cdot I_S = 295 \text{ K} \cdot 30 \text{ Ct/s} = 8850 \text{ W.}$$

Secondo i nostri calcoli il consumo di energia di un comune riscaldamento elettrico è nettamente maggiore di quello della pompa di calore. Nella pratica

la differenza non è poi così grande, perché anche in ogni pompa di calore viene prodotta un po' di entropia.

Esercizi

1. Una casa riscaldata a una temperatura di 20 °C con una stufa a olio combustibile, ha una perdita di calore di 35 Ct/s. Calcola il consumo di energia del riscaldamento.
2. Il radiatore di un'auto disperde nell'aria 60 Carnot al secondo e ha una temperatura di 90 °C. Qual è l'intensità della corrente di energia che fluisce dal radiatore all'aria?
3. La piastra di un ferro da stiro da 1000 W ha una temperatura di 300 °C. Quanta entropia esce ogni secondo dal ferro da stiro?
4. Una piscina è riscaldata con una pompa di calore. La pompa di calore prende l'entropia da un ruscello che scorre nelle vicinanze. La temperatura dell'acqua nel ruscello è di 15 °C, quella dell'acqua nella piscina 25 °C. L'acqua della piscina disperde entropia nell'ambiente a un ritmo costante di 500 Ct al secondo. Affinché mantenga la sua temperatura, la pompa di calore deve costantemente sostituire questa entropia. Calcola il consumo di energia della pompa di calore?
5. (a) Una casa è riscaldata con una pompa di calore. La temperatura esterna è 0 °C, la temperatura in casa 25 °C. La pompa di calore trasporta 30 Ct/s. Calcola il consumo di energia.
(b) La stessa casa viene riscaldata con un comune riscaldamento elettrico, in altre parole i 30 Ct/s non vengono pompati dall'esterno ma prodotti nella casa. Calcola il consumo di energia.

11.3 Produzione di entropia per mezzo di correnti di entropia

Una sbarra fatta di un materiale che conduce bene il calore, è attraversata da una corrente di entropia, fig. 11.7. La corrente è mantenuta da una differenza di temperatura. A parte alle estremità, la sbarra è isolata, così che non vada persa entropia. All'inizio dell'esperimento le temperature nei diversi punti della sbarra varieranno. Dopo un po' di tempo queste variazioni si interrompono: si instaura un *equilibrio dinamico*.

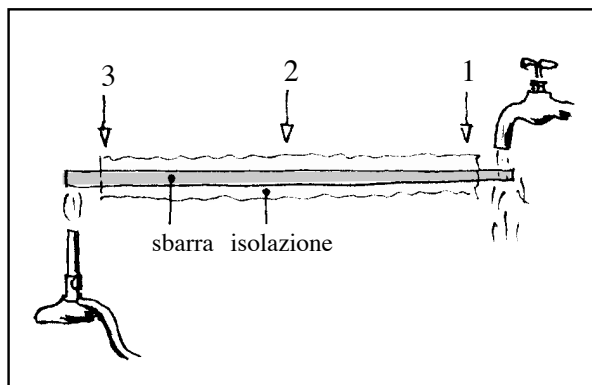


Fig. 11.7. Dall'estremità destra della sbarra esce più entropia di quanta ne sia affluita da sinistra.

L'equazione che lega le intensità delle correnti di entropia e di energia, fa un'affermazione sorprendente riguardo a questo semplice esperimento.

Consideriamo tre diversi punti della sbarra: l'estremità destra fredda, il centro e l'estremità sinistra calda. Contrassegniamo i valori riferiti a questi punti rispettivamente con un "1", un "2" e un "3". Da sinistra affluisce alla sbarra una corrente di energia di intensità P_3 . Visto che si è in equilibrio dinamico, l'energia non si accumula in nessun punto e la corrente di energia deve avere in ogni punto la stessa intensità:

$$P_3 = P_2 = P_1 \quad (4)$$

Sappiamo che la relazione tra intensità della corrente di energia P e intensità della corrente di entropia I_S è

$$P = T \cdot I_S \quad (5)$$

Sostituiamo le intensità della corrente di energia di equazione (4) con l'aiuto dell'equazione (5) e otteniamo:

$$T_3 \cdot I_{S3} = T_2 \cdot I_{S2} = T_1 \cdot I_{S1} \quad (6)$$

Sappiamo inoltre che la temperatura T_3 è più alta di T_2 e che T_2 è più alta di T_1 :

$$T_3 > T_2 > T_1.$$

Affinché l'equazione (6) sia valida, deve valere:

$$I_{S3} < I_{S2} < I_{S1}$$

vale a dire: la corrente di entropia diventa più intensa da sinistra verso destra. A destra, dove c'è l'acqua fredda, esce più entropia dalla sbarra di quanta ne sia entrata a sinistra, dove c'è la fiamma. Di conseguenza nella sbarra deve essere stata prodotta entropia. Come è possibile?

In fondo questo risultato non è poi così sorprendente come può sembrare. Abbiamo già constatato che viene sempre prodotta entropia durante un qualsiasi processo di attrito, quando una corrente è confrontata con una resistenza. Esattamente come succede in questo caso. Tuttavia, qui ciò che fluisce non è un liquido e non è un gas, non è nemmeno quantità di moto o elettricità, ma è l'entropia stessa. Quindi,

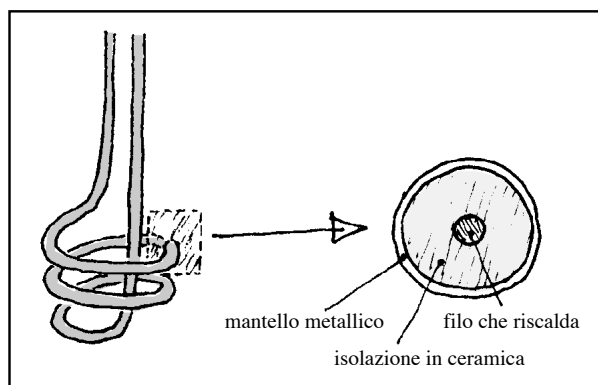


Fig. 11.8. Riscaldatore a immersione. Sulla destra, una sezione (semplificata e ingrandita).

viene prodotta entropia anche quando in una resistenza fluisce entropia.

Possiamo immaginare l'entropia all'uscita dalla sbarra, cioè all'estremità destra, come suddivisa in due parti: la parte che è affluita da sinistra e quella prodotta nel tragitto da sinistra a destra. Quindi:

$$I_{S1} = I_{S3} + I_{S \text{ prodotta}}$$

$I_{S \text{ prodotta}}$ è la quantità di entropia prodotta nella sbarra ogni secondo.

Quando dell'entropia fluisce in una resistenza termica, viene prodotta dell'altra entropia.

Esempio: il filo della resistenza di un riscaldatore a immersione di 700 W, fig. 11.8, è a una temperatura di 1000 K (727 °C). La corrente di entropia che fuoriesce dal filo ha un'intensità di:

$$I_S = \frac{P}{T} = \frac{700 \text{ W}}{1000 \text{ K}} = 0,7 \text{ Ct/s}$$

La temperatura sulla superficie esterna del riscaldatore è la stessa dell'acqua. Supponiamo che sia di 350 K (77 °C). Di conseguenza l'intensità della corrente di entropia nella parete esterna del riscaldatore a immersione è di:

$$I_S = \frac{P}{T} = \frac{700 \text{ W}}{350 \text{ K}} = 2 \text{ Ct/s}$$

Nel breve tragitto dal filo della resistenza alla parete esterna del riscaldatore vengono quindi prodotti:

$$(2 - 0,7) \text{ Ct/s} = 1,3 \text{ Ct/s}.$$

La corrente elettrica produce 0,7 Ct/s. La corrente di entropia verso l'esterno produce dunque più entropia della corrente elettrica.

Esercizi

1. Una casa viene riscaldata con 20 kW. La temperatura interna è 20 °C, la temperatura esterna -5 °C.

(a) Qual è l'intensità della corrente di entropia sulla parete interna della casa?

(b) Qual è l'intensità sulla parete esterna?

(c) Quanta entropia viene prodotta ogni secondo dalla corrente di entropia che fuoriesce dalla casa?

2. Il filo della resistenza di una piastra di cottura da 1000 W ha una temperatura di 1000 K.

(a) Quanta entropia viene prodotta ogni secondo nel filo?

(b) Una pentola contenente acqua a 373 K viene posta sulla piastra. Quanta entropia riceve l'acqua ogni secondo?

(c) Quanta entropia viene prodotta nel tratto che va dal filo della resistenza all'acqua?

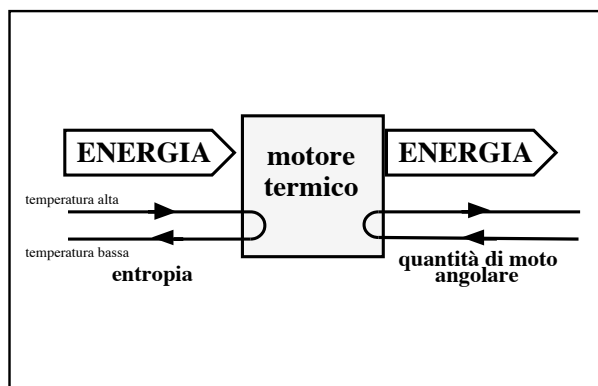


Fig. 11.9. Diagramma di flusso di un motore termico.

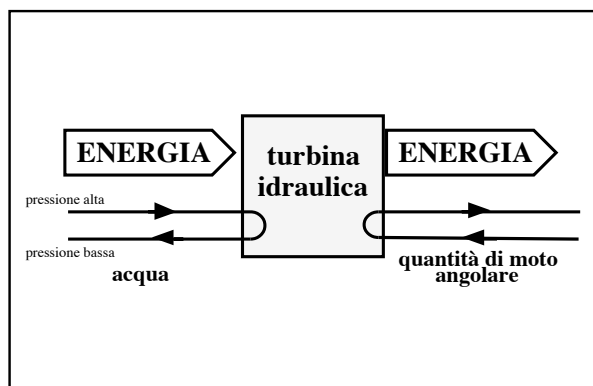


Fig. 11.10. Diagramma di flusso di una turbina idraulica.

11.4 I motori termici

Il modo migliore per spiegare cosa sia un motore termico è osservare il suo diagramma di flusso, fig. 11.9: un trasformatore di energia che riceve energia con il portatore entropia e la cede con il portatore quantità di moto angolare. Il fatto che il portatore di energia all'uscita della macchina sia la quantità di moto angolare, significa che l'energia passa da un albero motore; la macchina serve ad azionare qualcosa.

Appartengono alla categoria dei motori termici:

- la turbina a vapore
- la macchina a vapore
- tutti i motori a combustione interna (motore a scoppio e motore diesel)
- il motore a reazione
- altre macchine meno diffuse.

Vedremo più avanti nel dettaglio il funzionamento di queste macchine. Per ora ci occupiamo di ciò che tutti i motori termici hanno in comune. Per arrivarci prendiamo una piccola deviazione.

La fig. 11.10 mostra il diagramma di flusso di una turbina idraulica, quindi di un apparecchio che non è un motore termico. Nella turbina idraulica affluisce acqua ad alta pressione che poi fuoriesce a pressione più bassa. L'acqua ad alta pressione porta molta energia, quella a pressione più bassa ne porta poca. Nella turbina, l'acqua "scende" dall'alta alla bassa pressione e scarica energia. Questa energia lascia la turbina attraverso l'albero con il portatore quantità di moto angolare.

Il confronto tra la fig. 11.10 e la fig. 11.9 evidenzia che il motore termico e la turbina idraulica hanno in comune qualcosa di essenziale. Nel motore termico affluisce entropia a temperatura alta, cioè entropia che porta molta energia. La stessa entropia defluisce a temperatura più bassa, cioè portando meno energia. Nel motore, l'entropia "scende" dall'alta alla bassa temperatura e scarica energia. Anche questa energia lascia la turbina attraverso l'albero con il portatore quantità di moto angolare.

In un motore termico l'energia viene trasferita dal portatore entropia al portatore quantità di moto angolare.

Calcoliamo l'energia ceduta dal motore termico ogni secondo. La macchina riceve in entrata, alla temperatura T_A , una corrente di energia di intensità $T_A I_S$ e cede in uscita, alla temperatura inferiore T_B , una corrente di energia di intensità $T_B I_S$. La differenza tra le intensità è l'energia che viene trasferita sulla quantità di moto angolare. Quindi, con la quantità di moto angolare, dalla macchina esce una corrente di energia di intensità:

$$P = T_A I_S - T_B I_S = (T_A - T_B) I_S$$

Un motore termico cede con il portatore quantità di moto angolare tanta più energia

- quanto più intensa è la corrente di entropia che scorre nella macchina;
- quanto maggiore è l'abbassamento di temperatura della corrente di entropia.

Nella maggior parte delle centrali elettriche il generatore è azionato da un motore termico. Il diagramma di flusso delle due macchine collegate è mostrato in fig. 11.11. Possiamo però rappresentare simbolicamente i due trasformatori di energia con un'unica scatola, fig. 11.12. Confronta questo diagramma di flusso con quello di una pompa di calore elettrica, riproposto in fig. 11.13 (è lo stesso che in fig. 11.5). I diagrammi di flusso si differenziano solo nella direzione delle frecce.

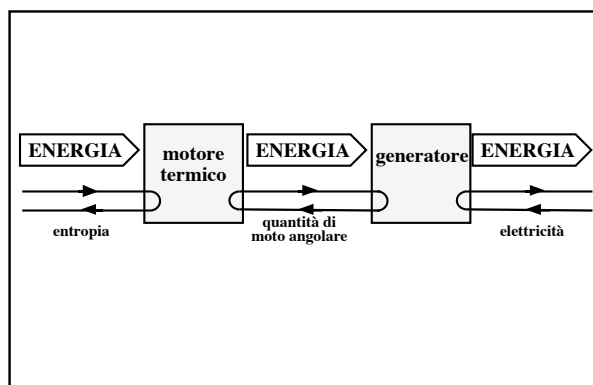


Fig. 11.11. Diagramma di flusso di una centrale termica.

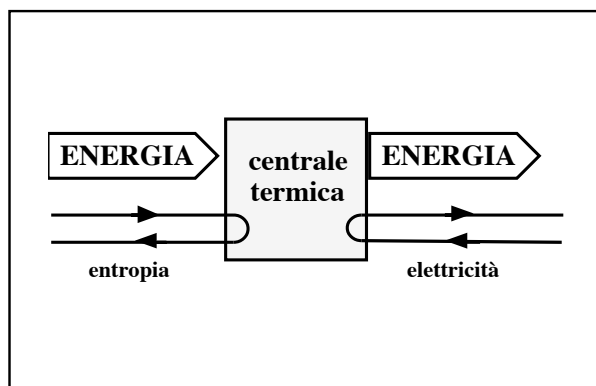


Fig. 11.12. Diagramma di flusso di una centrale termica. Turbina e generatore sono rappresentati da un solo simbolo.

Ne deduciamo che una centrale elettrica fa esattamente il contrario di una pompa di calore. Mentre una pompa di calore elettrica trasferisce energia dal portatore elettricità al portatore entropia, nella centrale elettrica di fig. 11.12 l'energia viene trasferita dall'entropia all'elettricità.

Una centrale termica trasferisce energia dall'entropia all'elettricità. Una centrale del genere è un impianto molto grande e complesso. Esistono apparecchi che fanno la stessa cosa, cioè trasferire energia dall'entropia all'elettricità, ma che sono molto piccoli e maneggevoli e allo stesso tempo robusti, gli *elementi Peltier*.

E un elemento Peltier può addirittura essere usato a rovescio: come pompa di calore. È quindi una pompa di calore contemporaneamente semplice, non troppo cara e molto compatta.

Purtroppo gli elementi Peltier hanno delle grandi perdite di calore. Di conseguenza sono adatti solo per quelle applicazioni dove le perdite non hanno un ruolo importante.

11.5 Le sorgenti di entropia per i motori termici

Quando vogliamo far funzionare un motore termico sorgono sempre due problemi:

1) abbiamo bisogno di una sorgente di entropia a temperatura elevata,

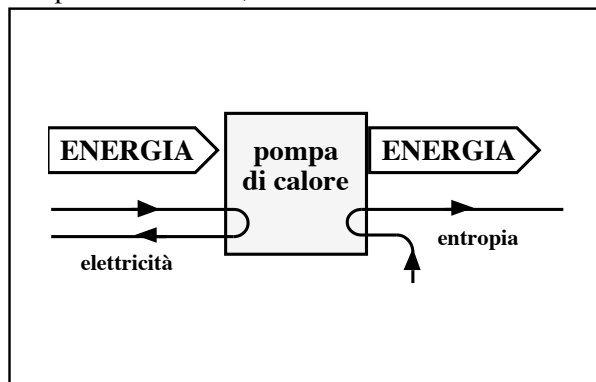


Fig. 11.13. Diagramma di flusso di una pompa di calore.

2) dobbiamo avere la possibilità di liberarci dell'entropia a una temperatura più bassa, per così dire necessitiamo di una "scarica per entropia".

Possiamo risolvere questi problemi in vari modi.

Sorgenti naturali di entropia

La soluzione che danneggia meno l'ambiente: sfruttiamo sorgenti naturali di entropia a temperatura elevata.

Ci sono alcuni luoghi sulla Terra dove del vapore caldo è imprigionato negli strati rocciosi a una profondità non troppo grande. Lo portiamo in superficie con delle trivellazioni e lo utilizziamo per far funzionare una centrale elettrica. Purtroppo i luoghi dove sfruttare questa energia *geotermica* non sono molti.

Un'altra possibilità: con la luce solare la Terra riceve delle enormi quantità di entropia a temperatura molto alta. Questa entropia è già sfruttata in alcune *centrali solari*. Anche se questa sorgente di entropia è inesauribile, ci pone di fronte a problemi di difficile soluzione. Per cominciare la luce solare è sparsa su spazi immensi, l'entropia, e con lei l'energia, è estremamente diluita e deve essere "raccolta" da superfici molto grandi illuminate dal Sole. Lo si può fare erigendo degli specchi e concentrando la luce su una caldaia a vapore. Un secondo problema in relazione all'energia solare è il fatto che non sempre splende il Sole: di notte non c'è del tutto e in inverno, cioè quando il bisogno di energia è massimo, splende molto debolmente.

Sorgenti artificiali di entropia

L'entropia di gran lunga più usata per azionare dei motori termici è quella prodotta in un modo meno elegante: la si produce bruciando combustibili e carburanti, o con la fissione nucleare.

Visto che dei motori termici si fa ampio uso, non si pone solo il problema di procurarsi l'entropia ma anche quello della "scarica termica". Vediamo come risolvono il problema i motori termici più importanti.

Centrali termiche

La maggior parte delle centrali lavora con le turbine. Nelle centrali a carbone l'entropia è prodotta nella caldaia a vapore bruciando carbone. Nelle centrali nucleari è prodotta nel reattore con la fissione di atomi di uranio e plutonio.

Quando l'entropia lascia la centrale elettrica, la temperatura è solo leggermente superiore a quella dell'ambiente. Di solito l'entropia è ceduta all'acqua di un grande fiume. Se non c'è un fiume, o se non ha abbastanza acqua, viene ceduta all'aria attraverso delle torri di raffreddamento.

Motori a combustione interna

L'entropia è prodotta all'interno del motore bruciando il carburante - benzina o gasolio. La maggior parte lascia il motore con i gas di scarico. A essere precisi, il diagramma di flusso in fig. 11.9 non corrisponde affatto a un motore a combustione interna, visto che al motore non affluisce entropia dall'esterno.

Macchine a vapore

Prima dell'apparizione dei motori elettrici e di quelli a combustione interna erano i propulsori più importanti. Erano usate nelle locomotive a vapore, nei piroscafi, negli aratri a vapore, per azionare trebbiatrici e le macchine di molte fabbriche.

Anche in questo caso l'entropia era prodotta nella caldaia a vapore bruciano carbone. Dopo aver azionato le macchine, di solito il vapore era semplicemente liberato nell'aria. Con il vapore se ne andava nell'aria anche l'entropia.

Motore a reazione

Serve a far volare la maggior parte dei grandi aerei di linea. Non corrisponde esattamente alla nostra definizione di motore termico. Non cede energia grazie a un albero con la quantità di moto angolare, ma con il portatore di energia quantità di moto, fig. 11.14. "Pompa" quantità di moto dall'aria nell'aereo.

Come per il motore a combustione interna, l'entropia viene prodotta nella macchina mediante combustione di un carburante, e lascia il motore con i gas di scarico.

Esercizi

1. Un motore termico è attraversato da una corrente di entropia di 100 Ct/s. La temperatura all'entrata è 150 °C, all'uscita 50 °C. Quanta energia con il portatore quantità di moto angolare cede il motore ogni secondo?

2. Una centrale elettrica cede con l'elettricità una corrente di energia di 1000 MW. La temperatura del vapore all'entrata della turbina è 750 K, all'uscita 310 K. Qual è l'intensità della corrente di entropia che defluisce con l'acqua di raffreddamento? Qual è l'intensità della corrente di energia portata da

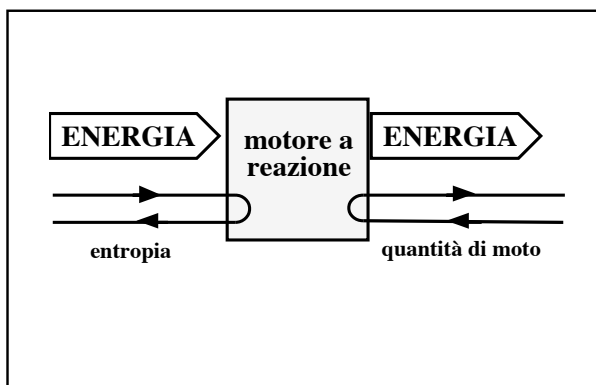


Fig. 11.14. Diagramma di flusso di un motore a reazione.

questa corrente di entropia?

3. Pensa a delle possibilità per sfruttare l'entropia a temperatura elevata presente in natura. Discuti anche quelle che non ti sembrano realistiche.

11.6 Le perdite di energia

Nel tragitto dal rubinetto allo spruzzatore viene persa acqua, fig. 11.15. Dal rubinetto escono 2 litri d'acqua al secondo, allo spruzzatore arrivano solo 1,8 litri al secondo. La differenza, cioè 0,2 l/s, è fuoriuscita dal foro nel tubo. Abbiamo una *perdita* di 0,2 l/s. Si tende a esprimere la perdita come percentuale di quanto si aveva all'inizio. Esprimiamo questa perdita con un valore percentuale. Nel nostro caso quindi:

$$\text{perdita} = \frac{0,2 \text{ l/s}}{2 \text{ l/s}} \cdot 100\% = 10\%$$

In quasi tutti gli apparecchi che trasferiscono energia su un altro portatore e in quasi tutti i conduttori che servono alla trasmissione di energia, ci sono delle perdite di energia. Cosa significa? L'energia non può certo essere annientata! È come per l'acqua in fig. 11.15: una parte dell'energia non arriva là dove dovrebbe, per così dire va persa per strada.

Le perdite di energia sono quasi sempre causate da produzione di entropia. Consideriamo una turbina idraulica. Finora abbiamo disegnato il diagramma di flusso di una turbina idraulica come in fig. 11.16 (vedi anche la fig. 11.10). In realtà questa sarebbe una turbina perfetta, idealizzata, come non ce ne sono, perché in ogni turbina reale viene involontariamente prodotta entropia in vari punti: dall'attrito tra l'acqua e le pareti dei tubi, dall'attrito dell'acqua con se stessa (attrito interno) e dall'attrito nei supporti dell'albero della turbina. L'entropia prodotta lascia la turbina in vari modi: in parte nell'acqua che defluisce, in parte nell'aria dell'ambiente.

Con questa entropia viene persa anche dell'energia. La fig. 11.17 mostra il diagramma di flusso di una turbina reale. La larghezza delle frecce di energia è proporzionata alle intensità delle correnti cosspondenti.

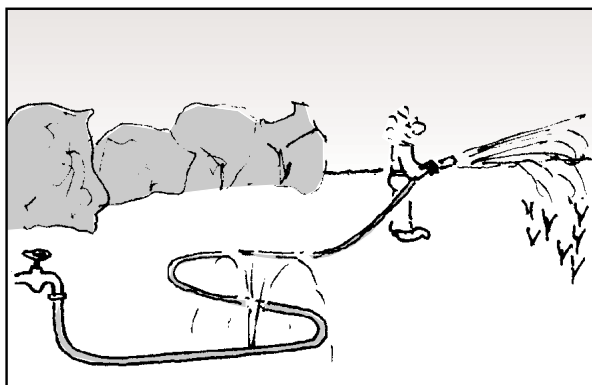


Fig. 11.15. A causa del foro nel tubo, viene persa acqua.

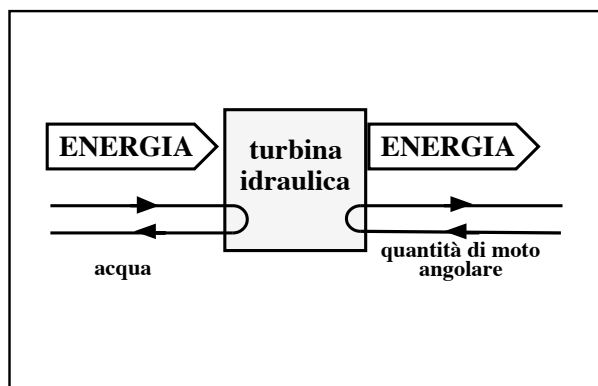


Fig. 11.16. Diagramma di flusso di una turbina idraulica ideale.

Chiamiamo P_{perdita} l'intensità della corrente di energia persa. La relazione tra entropia prodotta e energia persa è allora

$$P_{\text{perdita}} = T \cdot I_S \text{ prodotta}$$

e la perdita (percentuale) della macchina

$$\text{perdita} = \frac{P_{\text{perdita}}}{P_{\text{entrata}}} \cdot 100\% \quad (7)$$

P_{entrata} è l'intensità della corrente di energia che affluisce alla macchina.

La fig. 11.18 mostra il diagramma di flusso di un motore elettrico reale, non idealizzato. Anche qui, involontariamente viene prodotta entropia. Una parte dell'entropia è prodotta nei fili (quando un filo è attraversato da una corrente elettrica viene sempre prodotta entropia), un'altra parte nei supporti.

Con la formula (7) si può calcolare anche la perdita di energia di un semplice cavo elettrico.

Abbiamo visto che le perdite di energia dipendono dalla produzione di entropia. Naturalmente si vogliono evitare queste perdite. Prendi nota:

Evita la produzione di entropia.

Per certi trasferitori di energia le perdite sono molto importanti. In tabella 11.1 sono elencati alcuni valori tipici.

Forse ti meravigli delle grosse perdite delle centrali elettriche. Le perdite nella turbina a vapore e nel

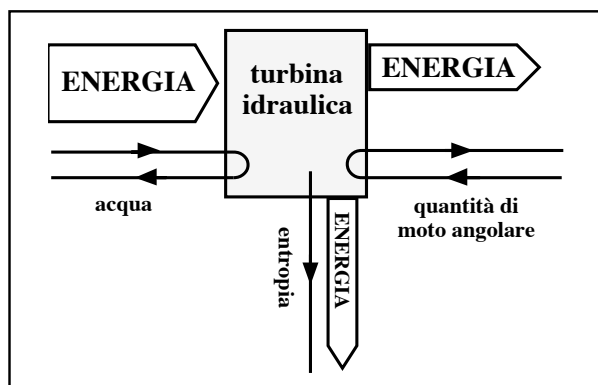


Fig. 11.17. Diagramma di flusso di una turbina idraulica reale

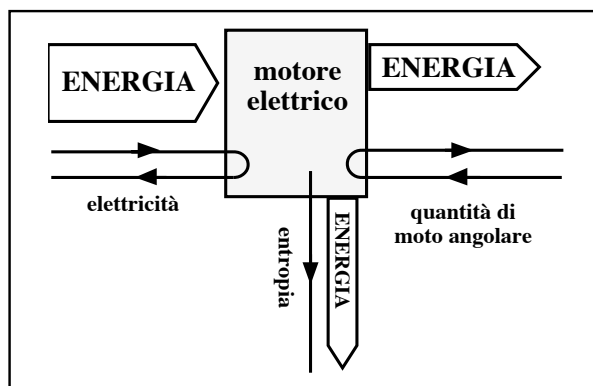


Fig. 11.18. Diagramma di flusso di un motore elettrico non idealizzato.

generatore sono solo una piccola parte. La causa principale è che nella camera di combustione rispettivamente nel reattore, viene prodotta entropia. Ma allora come possiamo parlare di perdite? Non dobbiamo produrre questa entropia proprio per far funzionare la centrale? Non necessariamente.

In linea di massima potremmo trasferire l'energia del carbone (risp. dell'uranio) direttamente all'elettricità, senza passare dall'entropia e dalla quantità di moto angolare. Gli apparecchi che lo fanno sono detti *celle a combustibile*. Il funzionamento di una cella combustibile è simile a quello di una pila. Essenzialmente è una pila che viene costantemente rifornita della sostanza che consuma. Per ora le celle combustibili lavorano però solo con combustibili liquidi o gassosi molto puri e non con carbone. Inoltre la loro vita media è troppo breve per fare concorrenza alle comuni centrali elettriche.

Esercizi

1. Il motore di un'auto cede 20 kW attraverso l'albero motore. Alle ruote giungono solo 18 kW perché nella trasmissione e nelle sospensioni (per attrito) viene prodotta entropia. Qual è la perdita percentuale?
2. Un motore elettrico consuma 10 W e ha una perdita del 40%. Quanta energia al secondo cede con la quantità di moto angolare? Quanta entropia al secondo produce? (La temperatura ambiente è 300 K.)

Tab. 11.1. Valori tipici delle perdite di energia

	perdita
grande turbina a vapore	10%
grande motore elettrico	10%
motore elettrico da giocattolo	40%
cellula solare	90%
centrale a carbone	57%
centrale nucleare	67%

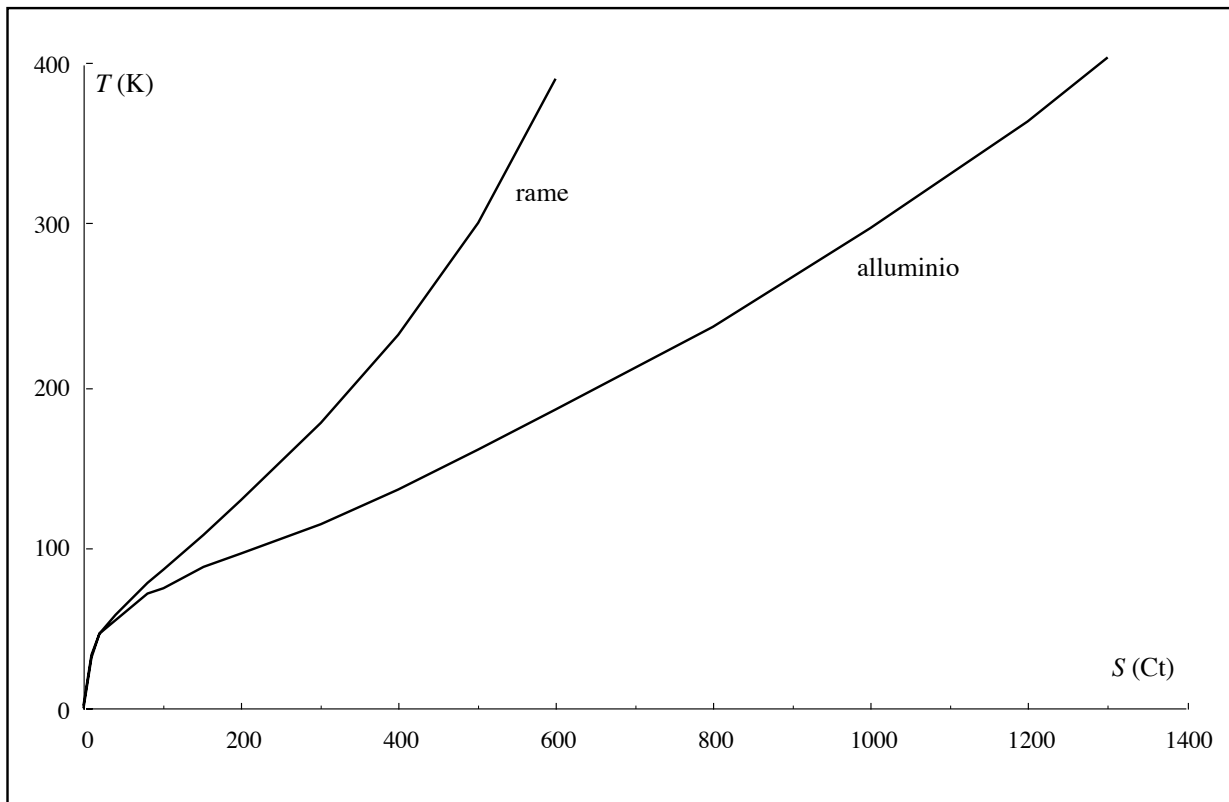


Fig. 11.19. Temperatura in funzione del contenuto di entropia, per 1 kg di rame e 1 kg di alluminio.

3. Un generatore che ha una perdita dell'8%, cede con l'elettricità una corrente di energia di 46 kW. Qual è l'intensità della corrente di energia che affluisce al generatore dall'albero? Che intensità ha la corrente di energia di perdita? Qual è l'intensità della corrente di entropia prodotta? (La temperatura ambiente è 300 K.)

11.7 La relazione tra contenuto di entropia e temperatura

Se forniamo entropia a un corpo, la sua temperatura aumenta. Perlomeno era così per gli oggetti visti finora. (Più avanti conosceremo casi dove ciò non succede.)

Da cosa dipende l'entità del riscaldamento di un corpo a cui forniamo una determinata quantità di entropia?

Innanzitutto ovviamente dalla grandezza del corpo, più precisamente dalla sua massa. Possiamo anche dire: se due corpi sono fatti dello stesso materiale ma uno ha massa doppia dell'altro, per portare entrambi da 0 K alla stessa temperatura finale, ci vuole il doppio di entropia per il corpo pesante che per quello leggero.

La quantità di entropia necessaria dipende inoltre dal materiale di cui sono fatti gli oggetti. La fig. 11.19 mostra come la temperatura aumenta con il contenuto di entropia per un corpo di rame e per uno

di alluminio, entrambi di massa 1 kg. Dal grafico deduciamo che ci vuole meno entropia per portare a una determinata temperatura il rame che l'alluminio. Per esempio: a una temperatura di 300 K il contenuto del rame è di circa 500 Ct, quello dell'alluminio 1000 Ct, quindi il doppio di quello del rame.

Oppure, dal grafico deduciamo che con una determinata quantità di entropia il rame si riscalda più dell'alluminio: con 500 Ct il rame raggiunge i 300 K, l'alluminio solo circa 150 K.

Se ci interessa sapere cosa succede attorno alla temperatura ambiente, è più adatto un grafico i cui assi non comincino da zero: un dettaglio ingrandito del grafico originale.

La fig. 11.20 mostra questi ingrandimenti per 1 kg di rame, ferro, alluminio, olio combustibile e acqua. Più la curva è ripida, meno entropia ci vuole per causare una determinata variazione di temperatura.

Esercizi

1. A un chilogrammo di rame e a un chilogrammo di alluminio, entrambi alla temperatura iniziale di 25 °C, vengono forniti 80 Ct. Quale metallo si riscalda di più? Di che fattore si differenziano le due variazioni di temperatura?
2. Quanta entropia ci vuole per riscaldare 100 l d'acqua da 20 °C a 100 °C? (1 l d'acqua ha una massa di 1 kg).

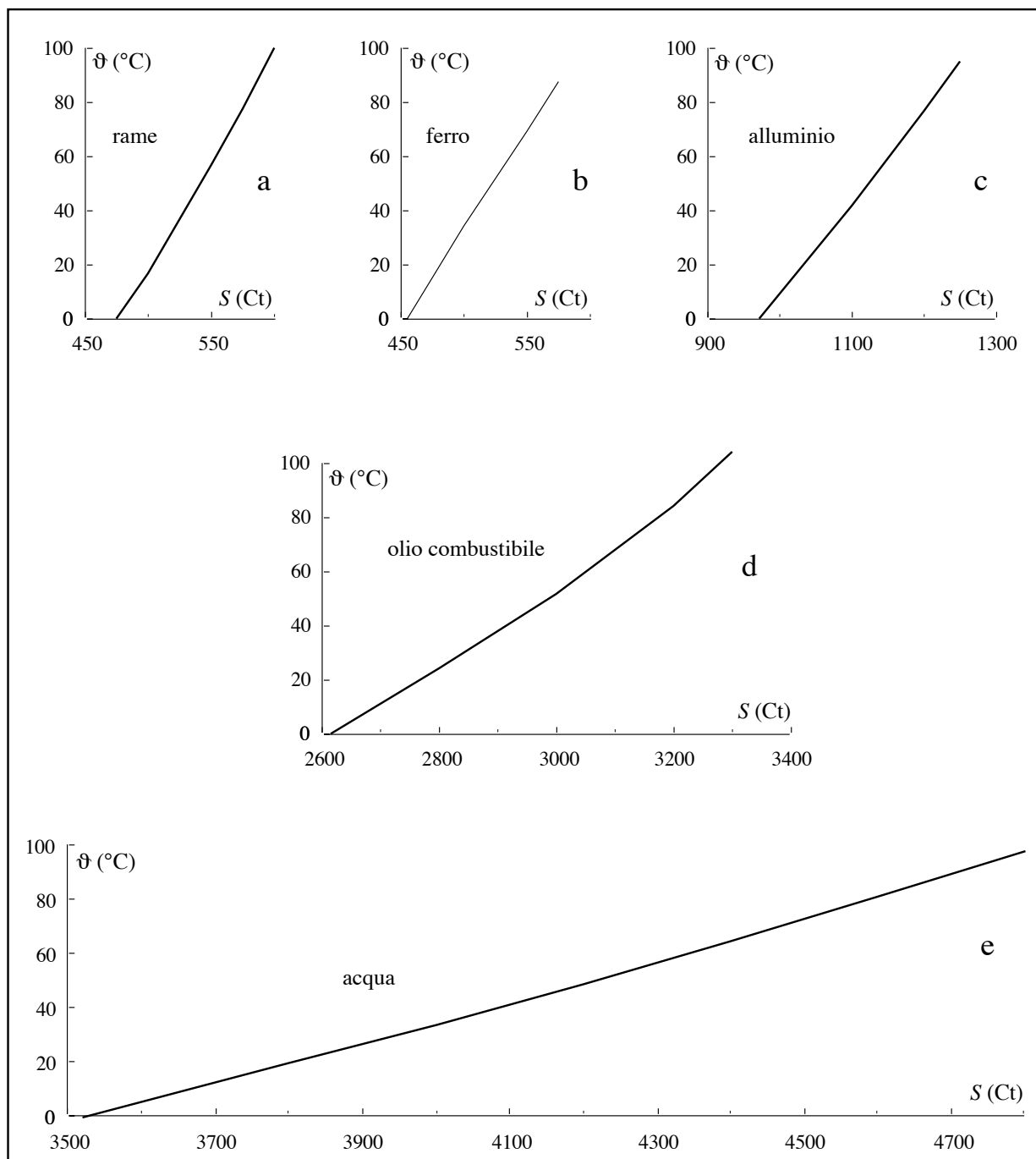


Fig. 11.20. Temperatura in funzione del contenuto di entropia per 1 kg di (a) rame, (b) ferro, (c) alluminio, (d) olio combustibile, (e) acqua. Le rispettive scale dell'entropia non cominciano con il valore $S = 0$ Ct. Le scale della temperatura non cominciano allo zero assoluto ma allo zero della scala Celsius.

11.8 La relazione tra apporto di energia e variazione di temperatura

Per scaldare l'acqua dobbiamo fornirle entropia. Assieme all'entropia, l'acqua riceve anche energia. Probabilmente questo fatto è noto ai più: si sa che scaldare l'acqua costa dei soldi e che questi soldi servono a pagare l'energia.

Vogliamo trovare una formula per il consumo di energia necessario a scaldare l'acqua. Chiamiamo ΔE la quantità di energia fornita durante il riscal-

damento dell'acqua, da non confondere con l'energia totale contenuta nell'acqua. Per riscaldare 1 kg d'acqua da 20°C a 100°C ci vuole una certa quantità di energia. Per riscaldare 2 kg d'acqua da 20°C a 100°C naturalmente ce ne vuole il doppio. Quindi deve valere:

$$\Delta E \sim m.$$

L'energia necessaria al riscaldamento dell'acqua è proporzionale alla sua massa.

Inoltre l'energia ΔE dipende anche da quanti $^{\circ}\text{C}$ vogliamo aumentare la temperatura. Se la temperatura deve aumentare di 20°C ci vuole più energia che se deve aumentare solo di 10°C . Con un riscaldatore a immersione forniamo energia a una determinata quantità d'acqua e misuriamo l'aumento di temperatura ΔT in funzione dell'energia fornita ΔE . Constatiamo che ΔT è proporzionale a ΔE :

$$\Delta E \sim \Delta T.$$

Questa relazione non è più valida a temperature molto alte e nemmeno a temperature molto basse, ma è soddisfatta nell'intervallo tra 0°C e 100°C . Con la proporzionalità trovata in precedenza otteniamo:

$$\Delta E \sim m \cdot \Delta T.$$

Per fare di questa relazione di proporzionalità un'equazione, introduciamo la costante di proporzionalità c :

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

c viene detta *capacità termica specifica*. Affinché entrambi i termini dell'equazione abbiano le stesse unità di misura, c deve essere misurata in $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$.

Il valore di c dipende anche dal materiale del corpo che riscaldiamo o raffreddiamo. Per l'acqua:

$$c = 4180 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K}).$$

Esercizi

1. Dobbiamo scaldare mezzo litro d'acqua da 25°C a 100°C con un riscaldatore a immersione da 500 W . Quanto tempo ci vuole? (1 l d'acqua ha una massa di 1 kg.)

2. Qual è il consumo di energia per una doccia di cinque minuti?

Prima calcola quanti kg d'acqua calda vengono usati nei cinque minuti.

Supponi che durante la doccia dal rubinetto escano $0,1 \text{ l}$ d'acqua al secondo. Supponi inoltre che l'acqua affluisca allo scaldabagno a 15°C e ne fuoriesca a 45°C .

12. Transizioni di fase

12.1 Transizioni di fase

Immergiamo un riscaldatore in un bicchiere contenente acqua, lo accendiamo e misuriamo la temperatura dell'acqua, fig. 12.1. Mentre il riscaldatore a immersione fornisce entropia all'acqua, la temperatura aumenta - perlomeno all'inizio. Alla fine però, quando la temperatura ha raggiunto i 100 °C, l'acqua comincia a bollire e la temperatura non aumenta più, anche se il riscaldatore continua a cedere entropia. Come mai?

Bollendo, l'acqua si trasforma da liquida a gassosa, diventa *vapore acqueo*. Il vapore acqueo ha la stessa temperatura dell'acqua liquida durante la bollitura, cioè 100 °C. L'entropia che forniamo all'acqua evidentemente ora serve a farla evaporare. Ne concludiamo che il vapore acqueo contiene più entropia dell'acqua liquida.

Il vapore può essere ulteriormente riscaldato. Lo facciamo passare in un tubo e riscaldiamo il tubo dall'esterno, fig. 12.2.

La fig. 12.3 riporta la temperatura di 1 kg d'acqua in funzione del suo contenuto di entropia, per un intervallo di temperatura più grande che in fig. 11.20 (e). La curva ci dice che 1 kg di vapore acqueo contiene circa 6000 Ct in più di 1 kg di acqua liquida.

Il contenuto di entropia di 1 kg di vapore acqueo è 6000 Ct in più di quello di 1 kg d'acqua liquida.

Inoltre il diagramma mostra che un fenomeno simile succede alla transizione solido > liquido. L'acqua liquida contiene circa 1200 Ct in più dell'acqua solida, cioè del ghiaccio. Per trasformare 1 kg di ghiac-

cio a 0 °C in 1 kg d'acqua a 0 °C (vale a dire per fondere 1 kg di ghiaccio), gli si deve fornire una quantità di entropia di 1200 Ct. Allo stesso modo: per trasformare 1 kg di acqua liquida in un 1 kg di ghiaccio, dobbiamo toglierle 1200 Ct.

Il contenuto di entropia di 1 kg di acqua liquida è 1200 Ct in più di quello di 1 kg di ghiaccio.

A proposito dei termini: si dice che la materia si presenta in diverse *fasi*. Così l'acqua ha una fase solida, una liquida e una gassosa. La fase gassosa è anche detta vapore. Con vapore acqueo si intende quindi acqua gassosa. Ci sono espressioni specifiche anche per le transizioni tra le diverse fasi:

solido > liquido:	fondere;
liquido > solido:	solidificare;
liquido > gassoso:	evaporare;
gassoso > liquido:	condensare.

Non solo l'acqua si presenta in diverse fasi ma anche altre sostanze. Sai sicuramente che i metalli si possono fondere. Ma possono addirittura evaporare. Tutte le sostanze che normalmente sono gassose possono essere liquefatte e portate alla fase solida. La tabella 12.1 riporta la *temperatura di fusione* e la *temperatura di ebollizione* per alcune sostanze.

Ma non ci sono solo le tre fasi "solido", "liquido" e "gassoso", ce ne sono molte altre. Di solito le sostanze hanno diverse fasi solide che si differenziano in molte proprietà. Alcune sostanze hanno anche diverse fasi liquide con proprietà molto differenti.

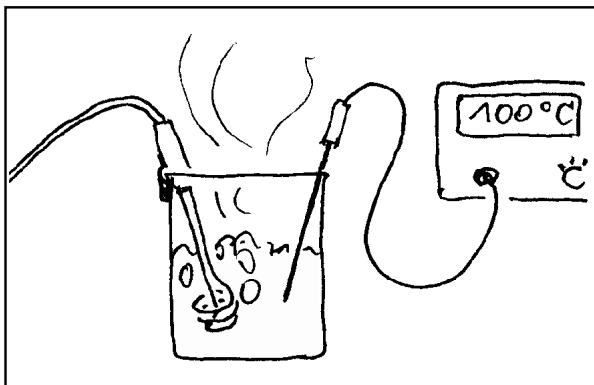


Fig. 12.1. Malgrado un ulteriore apporto di entropia, la temperatura smette di salire una volta raggiunti i 100 °C.

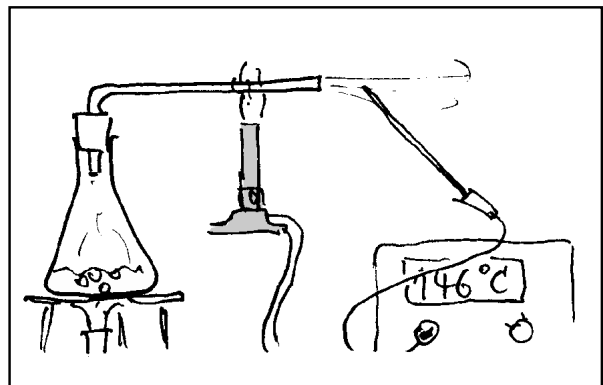


Fig. 12.2. Il vapore acqueo, inizialmente a una temperatura di 100 °C, viene ulteriormente riscaldato.

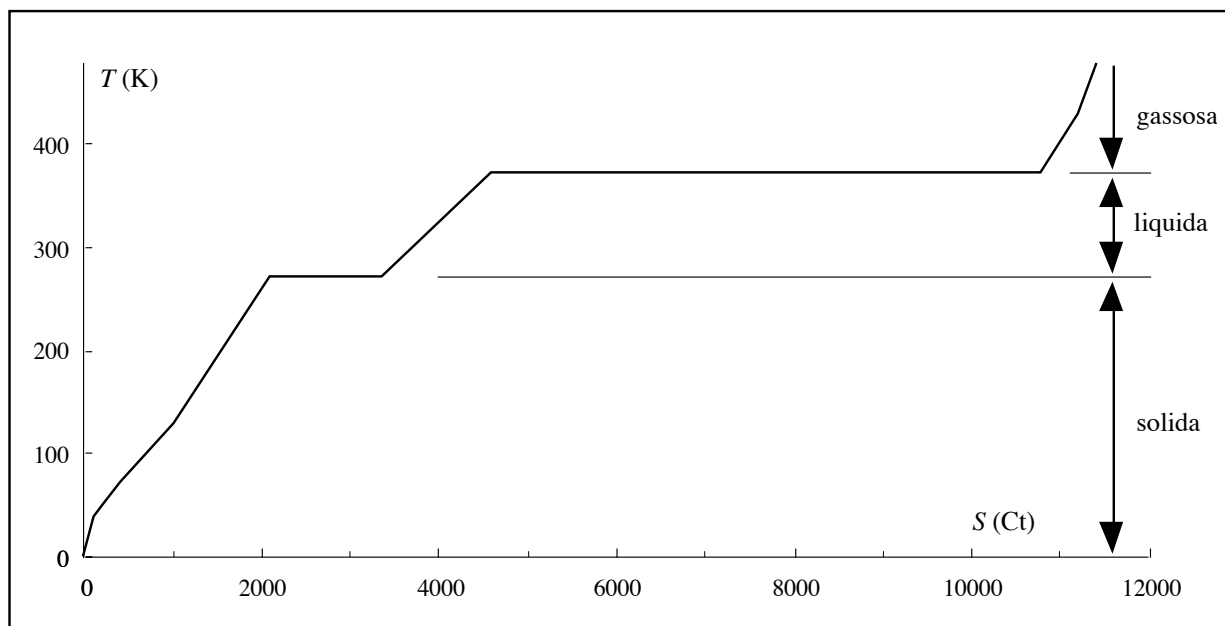


Fig. 12.3. Temperatura in funzione del contenuto di entropia per 1 kg d'acqua.

Esercizi

1. Leggi in fig. 12.3 quanta entropia hanno 1 kg di vapore acqueo a 100 °C e 1 kg d'acqua liquida a 100 °C. Il valore del vapore acqueo è superiore a quello del liquido di che fattore?
2. Quanta entropia serve per trasformare 10 l di acqua liquida a 90 °C in vapore a 100 °C?
3. Per fondere un blocco di ghiaccio ci vogliono 6000 Ct. Qual era la massa del ghiaccio?
4. Un quarto di litro di limonata viene raffreddato da 20 °C fino a 0 °C con dei cubetti di ghiaccio. Quanto ghiaccio fonde nel processo? (La limonata è praticamente acqua.)
5. Un bicchiere di latte (0,2 l) viene riscaldato da 15 °C a 60 °C con il getto di vapore di una caffettiera per espresso. Quanti grammi di vapore vengono utilizzati? (Il latte è sostanzialmente fatto d'acqua.)

12.2 Bollire e evaporare

Abbiamo visto che l'acqua bolle a 100 °C. Ma già a temperature più basse passa allo stato gassoso, però più lentamente. Riassumiamo i diversi termini: la

Tabella 12.1. Alcune temperature di fusione e ebollizione

sostanza	temperatura di fusione (°C)	temperatura di ebollizione (°C)
alluminio	660	2450
rame	1083	2590
ferro	1535	2880
acqua	0	100
etanolo	- 114,5	78,3
ossigeno	- 218,8	- 183
azoto	- 210	- 195,8
idrogeno	- 259,2	- 252,2

transizione liquido > gassoso è sempre detta "evaporare". Se l'evaporazione avviene alla temperatura di ebollizione, cioè velocemente, si parla anche di "bollire". Se avviene al di sotto della temperatura di ebollizione, cioè lentamente, diciamo che l'acqua evapora.

Perché l'evaporazione è lenta e l'ebollizione veloce? In cosa si differenziano i due processi? Consideriamo una superficie d'acqua a diverse temperature, fig. 12.4.

A 20 °C è sormontata da aria con una piccola parte di vapore acqueo. Affinché il processo di evaporazione possa svolgersi, questo vapore acqueo deve sparire verso l'alto, là dove l'aria contiene meno vapore acqueo. Un processo del genere, quando un gas (qui vapore acqueo) deve "farsi largo" attraverso un altro (qui aria), viene detto *diffusione*. Il secondo gas oppone una grande resistenza al movimento del primo. Nel nostro caso ciò significa che il vapore acqueo si allontana con difficoltà dalla superficie d'acqua.

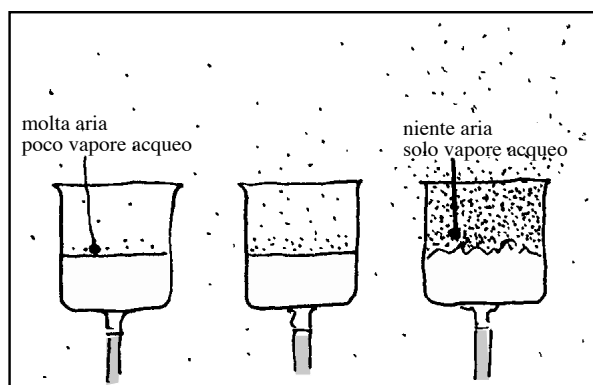


Fig. 12.4. Quando l'acqua bolle, il vapore acqueo spinge via tutta l'aria che sta sopra la superficie dell'acqua.

A temperature più elevate c'è più vapore acqueo sopra la superficie d'acqua. La spinta per il processo di diffusione ora è maggiore, il vapore acqueo se ne va più rapidamente. Di conseguenza anche l'acqua liquida può fornire vapore più in fretta: l'evaporazione è accelerata.

A 100 °C infine, sopra la superficie d'acqua resta solo puro vapore acqueo. Per allontanarsi dalla superficie d'acqua non ha più bisogno di farsi largo nell'aria. Non ha più bisogno di diffondere ma può scorrere liberamente come l'acqua in un tubo o come l'aria quando tira vento. Ora il vapore acqueo se ne va allo stesso ritmo a cui viene fornito dall'acqua liquida, e l'acqua liquida ne fornisce allo stesso ritmo con cui, dal riscaldamento, riceve l'entropia necessaria all'evaporazione.

Ora siamo in grado di capire un fenomeno interessante: se la pressione atmosferica è inferiore a 1 bar (pressione normale), l'acqua bolle a una temperatura inferiore a 100 °C. Questo perché, se la pressione atmosferica è inferiore, il vapore acqueo proveniente dalla superficie di acqua liquida riesce prima, cioè a temperatura inferiore, a spostare completamente l'aria.

Questo fenomeno si può osservare per esempio in montagna: su una cima elevata, cioè dove la pressione atmosferica è minore, la temperatura di ebollizione dell'acqua è inferiore a 100 °C. A 5400 m di altitudine la pressione atmosferica è circa 0,5 bar, la temperatura di ebollizione dell'acqua 83 °C.

12.3 Transizioni di fase in natura e nella tecnica

Durante una transizione di fase, una sostanza, a dipendenza della direzione della transizione, acquisisce o cede entropia senza cambiare temperatura. Questo fatto trova molte applicazioni tecniche ed è la spiegazione di alcuni fenomeni naturali interessanti.

Il freddo da evaporazione

Quando esci dalla piscina, e in particolare se l'aria si muove, hai freddo. L'acqua che hai sulla pelle evapora. Per farlo ha bisogno di entropia che preleva dal tuo corpo. L'evaporazione è particolarmente rapida se l'acqua già evaporata viene portata via dall'aria.

Il vapore caldo è più pericoloso dell'acqua calda

Se il tuo dito si bagna con acqua a 100 °C è molto meno grave che se viene in contatto con vapore a 100 °C. In entrambi i casi viene trasferita entropia al dito e ne può risultare un'ustione. Ma con il vapore il pericolo è maggiore, in quanto il vapore condensa sul dito e facendolo cedere al dito stesso un notevole quantitativo supplementare di entropia.

Le miscele refrigeranti

L'acqua salata ha una temperatura di fusione più bassa della normale acqua pura. Riempiamo un bicchiere di ghiaccio sbriciolato (o neve). Misuriamo la temperatura e, come previsto, troviamo 0 °C. Aggiungiamo ora un bel po' di sale da cucina e rimettiamo. La temperatura scende fin sotto i -10 °C.

Con l'aggiunta del sale la temperatura di fusione diminuisce. Una parte del ghiaccio fonde. Per farlo ci vuole entropia. Visto che l'entropia non è fornita dall'esterno, è il miscuglio acqua-ghiaccio che si raffredda. Dell'altro ghiaccio fonde e la temperatura scende ancora fino a raggiungere la nuova temperatura di fusione. A quel punto il processo si arresta.

Contenitori di entropia

Si può immagazzinare entropia riscaldando un oggetto. Se lasciamo uscire l'entropia dall'oggetto, l'oggetto si raffredderà di nuovo. Questo metodo è utilizzato nelle cosiddette stufe ad accumulazione, fig. 12.5. Una stufa ad accumulazione è composta in gran parte da mattonelle di ceramica. Durante la notte, cioè quando l'energia costa meno, le mattonelle vengono caricate di entropia e si riscaldano fino a più di 600 °C. Di giorno si recupera l'entropia soffiando aria attraverso le mattonelle.

In estate abbiamo a disposizione entropia in abbondanza. Sarebbe comodo immagazzinarla e metterla da parte per l'inverno. Il metodo delle stufe ad accumulazione però non è adatto, perché le mattonelle non possono assorbire molta entropia.

C'è un metodo più promettente che sfrutta una transizione di fase. Scegliamo una sostanza che abbia una transizione solido > liquido a una temperatura adatta. Circa 50 °C andrebbe bene. (Non deve essere una transizione solido > gassoso perché i gas occupano troppo spazio.) D'estate fondiamo una grande quantità della sostanza sfruttando l'entropia (e l'energia) del Sole. D'inverno preleviamo l'entropia e la usiamo per riscaldare la casa.

Se in futuro il prezzo dell'energia dovesse aumentare molto, questo metodo di sfruttamento dell'energia solare potrebbe diventare concorrenziale.

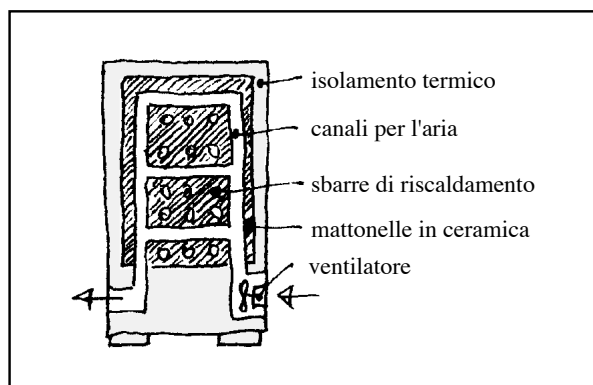


Fig. 12.5. Stufa ad accumulazione

Raffreddare le bevande con il ghiaccio

Per raffreddare una bevanda la possiamo mettere in frigo. La pompa di calore del frigorifero estrae entropia dalla bevanda. Spesso però si vuole raffreddare la bevanda, o perlomeno mantenerla fresca, lasciandola sul tavolo. Sai come fare: aggiungi un paio di cubetti di ghiaccio. Ma perché non aggiungere semplicemente un po' d'acqua fredda? Il risultato sarebbe decisamente peggiore. Il ghiaccio nella bevanda fonde e per fondere ha bisogno di entropia, che estrae dalla bevanda. La fusione continua fino a che la temperatura della bevanda raggiunge $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (a condizione che ci sia abbastanza ghiaccio).

Azoto liquido

Per raffreddare qualcosa a temperature molto più basse senza poter disporre della macchina del freddo adatta, si usa azoto liquido, acquistabile a buon mercato.

La temperatura di fusione dell'azoto è 77 K (vale a dire $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$). Ma come può esistere azoto liquido quando l'ambiente che lo circonda ha una temperatura molto più alta? Lo si conserva in un contenitore ben isolato termicamente. La poca entropia che esce dall'isolazione causa una costante, molto lenta ebollizione dell'azoto. La temperatura dell'azoto rimasto resta comunque di 77 K , esattamente come la temperatura dell'acqua che bolle resta a $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. In questo modo l'azoto liquido può essere mantenuto per giorni.

Trasporto di entropia con le transizioni di fase

Abbiamo visto in precedenza che il trasporto di entropia per convezione è molto più efficace di quello per conduzione termica. C'è un metodo di trasporto che funziona ancora meglio della normale convezione, fig. 12.6. La sostanza che si trova nei tubi viene fatta evaporare dove c'è la sorgente di entro-

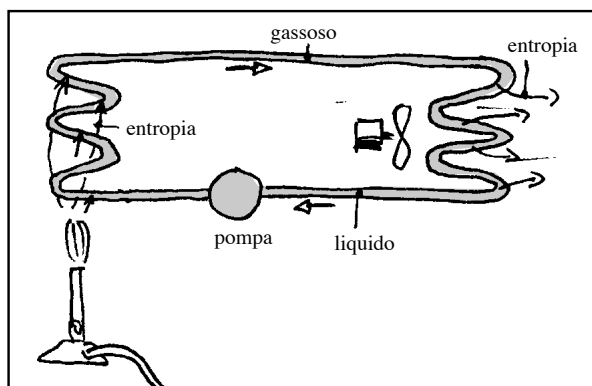


Fig. 12.6. A sinistra, una sostanza viene fatta evaporare. In questo modo si carica di molta entropia che cede nuovamente a destra, quando condensa.

pia, a sinistra. Così facendo assorbe molta entropia. Poi scorre verso destra nel tubo in alto, condensa nella serpentina a destra e cede l'entropia caricata in precedenza. Una volta i riscaldamenti centrali funzionavano secondo questo principio ed erano detti riscaldamenti a vapore. Avevano però qualche svantaggio: erano difficili da regolare e la condensazione del vapore nei caloriferi creava dei rumori fastidiosi.

Al giorno d'oggi questo metodo è usato soprattutto nelle pompe di calore, per esempio nel frigorifero. Un liquido refrigerante evapora nella serpentina all'interno del frigorifero, assorbendo entropia. Nella serpentina esterna condensa e cede entropia. (Affinché condensi nel punto più caldo e evaporino in quello più freddo, nel punto più caldo la pressione deve essere maggiore che in quello freddo. A questo pensa un compressore.)

Anche la natura sfrutta questo metodo di trasporto di entropia. Nell'atmosfera si svolgono incessantemente processi di evaporazione e di condensazione. Un punto da cui evapora acqua si raffredda. Il vapore acqueo viene portato con l'aria in un altro punto dove condensa. Lì diventa più caldo.

13. I gas

13.1 Gas e sostanze condensate

La materia può essere solida, liquida o gassosa.

Le fasi liquida e gassosa hanno qualcosa in comune: sia le sostanze liquide che quelle gassose possono fluire. Quando soffia il vento, o quando si accende un ventilatore o un asciugacapelli, scorre aria. L'acqua scorre in fiumi e ruscelli, nei mari e ovviamente anche quando si apre il rubinetto. Visto che le correnti di liquidi e quelle di gas hanno molto in comune, a volte liquidi e gas sono raggruppati in un'unica classe di sostanze: i cosiddetti *fluidi*. Quindi i fluidi sono l'opposto delle sostanze solide.

D'altro canto, anche le sostanze solide e quelle liquide hanno delle caratteristiche comuni, caratteristiche che le distinguono dai gas. Così le sostanze liquide e quelle solide hanno una densità molto più alta dei gas. Spesso anche le sostanze solide e liquide vengono raggruppate in una classe: le *sostanze condensate*. Le sostanze condensate sono l'opposto dei gas, fig. 13.1.

Cerchiamo altre proprietà che differenziano i gas dalle sostanze condensate.

La tendenza a espandersi

Aspiriamo l'aria da un recipiente di vetro e vi lasciamo gocciolare un po' d'acqua, fig. 13.2. L'acqua cade sul fondo, come in un recipiente pieno d'aria. Ripetiamo l'esperimento ma invece dell'acqua nel recipiente facciamo entrare aria. Per poter vedere dove va, prima la facciamo fluire attraverso una sigaretta. (Vedi a cosa servono le sigarette.) Questi esperimenti mostrano che:

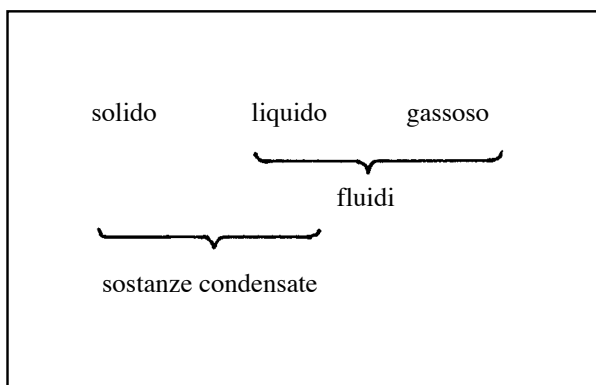


Fig. 13.1. Due suddivisioni in classi di sostanze

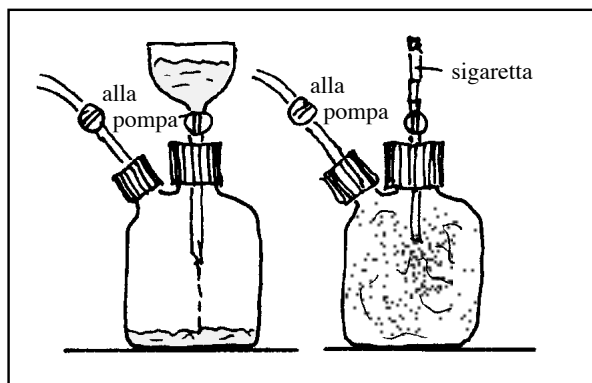


Fig. 13.2. I gas occupano tutto lo spazio a disposizione, i liquidi no

I gas occupano tutto lo spazio a loro disposizione, le sostanze condensate no.

Spesso per ridurre qualcosa a una breve formula si deve semplificare. La frase in grassetto è una di queste semplificazioni. Di solito è valida, ma non sempre. Non vale ad esempio per l'aria sopra la superficie terrestre, vista nel complesso. Quest'aria ha a disposizione tutto il cosmo. Ciononostante non si allontana dalla Terra. Come mai?

La comprimibilità

In un recipiente cilindrico con un pistone mobile, c'è aria. Se premiamo il pistone nel cilindro, l'aria viene schiacciata, o "compressa", fig. 13.3a. Se per contro nel cilindro invece di aria c'è acqua, fig. 13.3b, non si riesce a spingere il pistone. L'acqua non è comprimibile. Se osserviamo attentamente notiamo una piccolissima comprimibilità anche dell'acqua, ma per molti scopi pratici può essere trascurata.

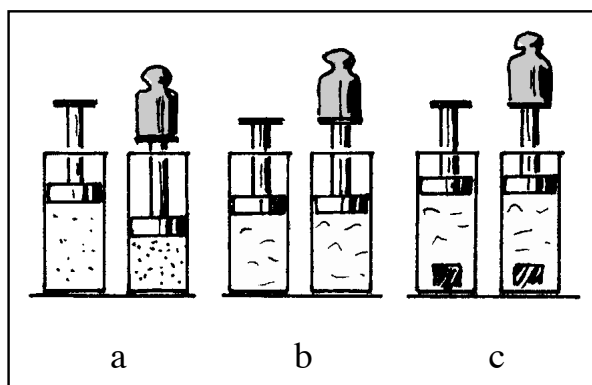


Fig. 13.3. I gas (a) sono comprimibili, i liquidi (b) e i solidi (c) non lo sono.

Anche quando nel cilindro oltre all'acqua mettiamo un oggetto solido, fig. 13.3c, non si riesce a spingere il pistone, in quanto anche gli oggetti solidi sono (quasi) incompressibili. Alcuni corpi solidi danno l'impressione di essere facilmente comprimibili, per esempio una spugna. In realtà ciò che comprimiamo non è la materia solida in sé, ma l'aria che si trova nei suoi pori.

Possiamo riassumere le nostre osservazioni:

I gas si lasciano comprimere facilmente, le sostanze condensate quasi per niente.

"Comprimere" significa diminuire il volume di una determinata porzione di materia senza che la sua massa cambi. Dalla formula $\rho = m/V$ segue che comprimendo, la densità della sostanza aumenta. Quindi la densità di una sostanza comprimibile può essere aumentata aumentando la pressione. Per una sostanza non comprimibile un aumento di pressione non causa una variazione della densità. Riassumendo:

Un aumento di pressione provoca nei gas un aumento della densità, nelle sostanze condensate no o quasi.

Questo fatto ha conseguenze interessanti, per esempio: la densità dell'acqua di un lago aumenta pochissimo con la profondità, malgrado l'aumento di pressione. A qualsiasi profondità la densità dell'acqua è praticamente la stessa, cioè 1000 kg/m^3 . Tutt'altra cosa per l'aria sopra la superficie terrestre. Salendo, diminuisce la pressione e di conseguenza anche la densità. Per questo scalando una montagna molto alta è sempre più faticoso respirare.

La dilatazione termica

I gas e le sostanze condensate reagiscono diversamente anche quando si fornisce loro entropia.

Se riscaldiamo un corpo solido il suo volume resta praticamente invariato. Lo stesso vale per i liquidi. Tutt'altro per i gas. Se riscaldiamo l'aria in un recipiente aperto verso l'alto, fig. 13.4a, si espande molto e "trabocca". Visto che l'aria è invisibile non ce ne

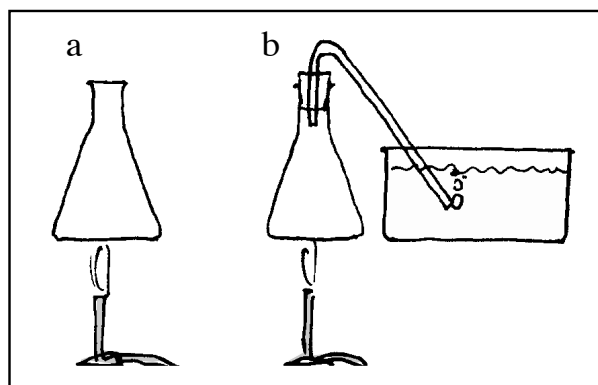


Fig. 13.4. I gas si espandono quando si fornisce loro entropia. Nell'esperimento di destra, viene reso visibile il traboccare dell'aria dal recipiente.

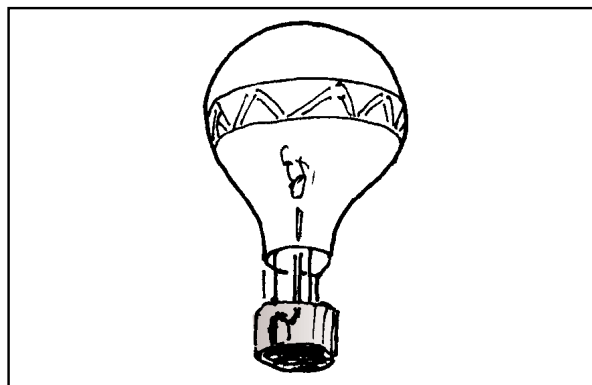


Fig. 13.5. Mongolfiera (per l'esercizio 2)

accorgiamo ma possiamo renderla visibile con un trucco, fig. 13.4b.

Un afflusso di entropia fa espandere un gas; non fa espandere o quasi una sostanza condensata.

Esercizi

1. Perché le gomme delle biciclette sono riempite d'aria? Perché non sono riempite d'acqua?
2. La fig. 13.5 mostra una mongolfiera. La mongolfiera è aperta verso il basso, l'aria che contiene viene riscaldata con una fiamma a gas. Perché la mongolfiera sale?

13.2 Le proprietà termiche dei gas

Nel paragrafo precedente abbiamo messo a confronto gas e sostanze condensate. D'ora in poi ci occuperemo solo dei gas. Per quanto riguarda le proprietà termiche, sono molto più interessanti delle sostanze condensate.

Per cominciare forniamo entropia a un gas. Però gli impediamo di espandersi rinchiudendolo in un recipiente rigido, fig. 13.6. Il manometro mostra che durante l'apporto di entropia la pressione aumenta. Possiamo riassumere questa osservazione e l'ultima del paragrafo precedente in:

Se forniamo entropia a un gas a pressione costante il suo volume aumenta.

Se forniamo entropia a un gas a volume costante la sua pressione aumenta.

Naturalmente in entrambi i casi aumenta anche la temperatura del gas.

Possiamo descrivere questi processi con dei simboli che indichino per ognuna delle quattro grandezze entropia, temperatura, volume e pressione, se rimane costante, aumenta o diminuisce:

$$S \uparrow \quad T \uparrow \quad V \uparrow \quad p = \text{cost} \quad (1)$$

$$S \uparrow \quad T \uparrow \quad V = \text{cost} \quad p \uparrow \quad (2)$$

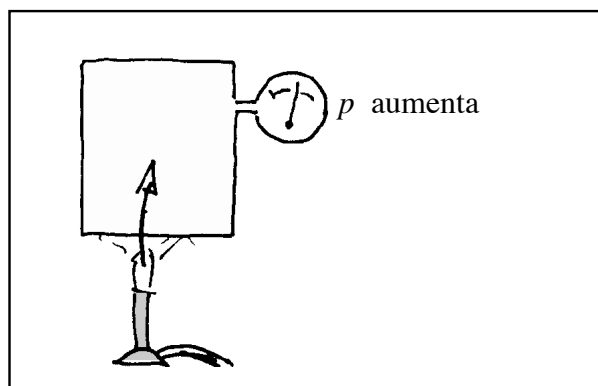


Fig. 13.6. Se forniamo entropia a un gas a volume costante, la sua pressione aumenta.

Comprimiamo nuovamente l'aria in un cilindro, ma questa volta misuriamo la temperatura, fig. 13.7. Constatiamo che comprimendo la temperatura aumenta. Se lasciamo espandere l'aria, la temperatura ridiscende.

Questo comportamento dell'aria in fondo è plausibile: comprimendo l'aria anche l'entropia che contiene viene compressa, concentrata in uno spazio più piccolo. Molta entropia in poco spazio significa quindi temperatura elevata.

Se riduciamo il volume di un gas la sua temperatura aumenta.

Espresso in simboli si ottiene:

$$S = \text{cost} \quad T \uparrow \quad V \downarrow \quad p \uparrow \quad (3)$$

Le espressioni da (1) a (3) descrivono tre diversi processi a cui si possono sottoporre i gas. Ovviamente valgono anche le affermazioni opposte. L'inversione della (1) darebbe:

$$S \downarrow \quad T \downarrow \quad V \downarrow \quad p = \text{cost}$$

In ognuno dei processi da (1) a (3) una delle grandezze è mantenuta costante: in (1) la pressione, in (2) il volume e in (3) l'entropia. Ci manca ancora un processo dove resta costante la temperatura. Ma anche questo è facile da realizzare. È sufficiente comprimere molto lentamente il gas di fig. 13.7, fig. 13.8. La compressione dovrebbe causare un aumento della temperatura. Se però premiamo

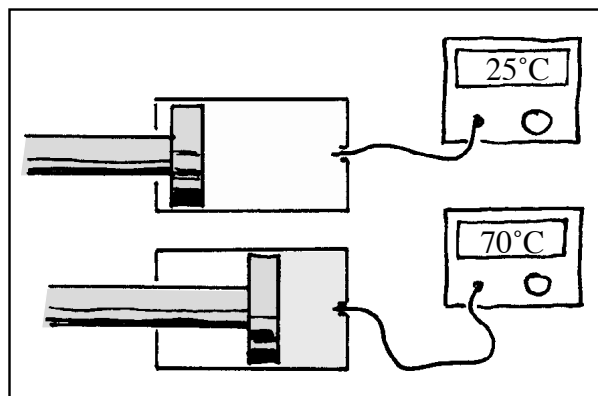


Fig. 13.7. Comprimendo un gas, la sua temperatura aumenta.

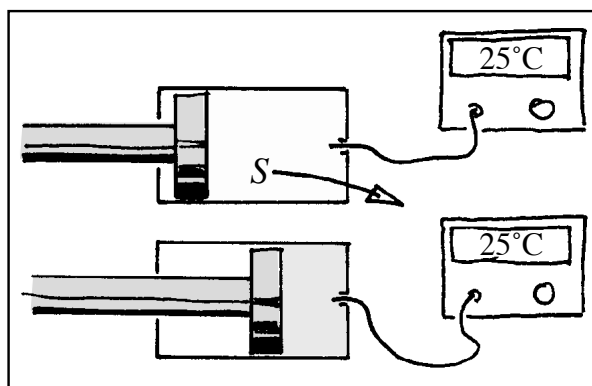


Fig. 13.8. Se spingiamo il pistone nel cilindro molto lentamente, dal gas sfugge entropia.

molto lentamente, l'aria ha il tempo di pareggiare in continuazione la temperatura dell'ambiente. In questo modo fluisce entropia dal gas all'ambiente. Di conseguenza nel gas ci deve essere meno entropia alla fine che all'inizio. In simboli otteniamo:

$$S \downarrow \quad T = \text{cost} \quad V \downarrow \quad p \uparrow \quad (4)$$

Anche questa è interessante. Conferma quanto avevamo sperimentato: più il volume di una porzione di materia è grande (con una determinata massa e a una determinata temperatura), più entropia contiene. Ce n'eravamo già accorti con la transizione di fase liquido > gassoso: alla stessa temperatura, il gas (grande volume) contiene più entropia del liquido (piccolo volume).

In fig. 13.9 sono riassunti i processi da (1) a (4) e i loro opposti.

Esercizi

1. Sono necessari: una bottiglia con chiusura ermetica, una ciotola con acqua calda e una con acqua fredda (vanno bene anche le due sezioni di un lavello).

a) L'aria nella bottiglia aperta viene raffreddata con l'aiuto dell'acqua fredda. La bottiglia viene chiusa e spinta sotto la superficie dell'acqua calda. Svitiamo leggermente il tappo in modo che la chiusura non sia più ermetica. Cosa succede? Come lo spieghi?

$S \uparrow$	$T \uparrow$	$V \uparrow$	$p = \text{cost}$	(1a)
$S \downarrow$	$T \downarrow$	$V \downarrow$	$p = \text{cost}$	(1b)
$S \uparrow$	$T \uparrow$	$V = \text{cost}$	$p \uparrow$	(2a)
$S \downarrow$	$T \downarrow$	$V = \text{cost}$	$p \downarrow$	(2b)
$S = \text{cost}$	$T \uparrow$	$V \downarrow$	$p \uparrow$	(3a)
$S = \text{cost}$	$T \downarrow$	$V \uparrow$	$p \downarrow$	(3b)
$S \downarrow$	$T = \text{cost}$	$V \downarrow$	$p \uparrow$	(4a)
$S \uparrow$	$T = \text{cost}$	$V \uparrow$	$p \downarrow$	(4b)

Fig. 13.9. Rappresentazione simbolica di quattro processi. In ognuno di loro, una delle quattro grandezze S , T , V e p , viene mantenuta costante

b) L'aria nella bottiglia aperta viene riscaldata con l'aiuto dell'acqua calda. La bottiglia viene chiusa e spinta sotto la superficie dell'acqua fredda. Svitiamo leggermente il tappo. Cosa succede? Come lo spieghi?

2. In due contenitori c'è la stessa quantità dello stesso gas alla stessa temperatura. Ai due gas viene fornita la stessa quantità di entropia. Di uno viene mantenuto costante il volume, dell'altro la pressione. Le variazioni di temperatura dei gas sono uguali? Se la risposta è no, in quale gas la variazione di temperatura è maggiore? La temperatura aumenta o diminuisce? Motiva le risposte!

3. Come si può fare per diminuire la temperatura di un gas malgrado gli si fornisca entropia?

13.3 Il funzionamento dei motori termici

Nel paragrafo 11.4 avevamo visto che in un motore termico l'entropia va da una temperatura alta a una bassa e così facendo "azionata" qualcosa - esattamente come in una turbina idraulica l'acqua va da una pressione alta a una bassa e così aziona qualcosa.

Come facciamo a portare entropia da una temperatura alta a una bassa e far muovere qualcosa?

Portare l'entropia da una temperatura alta a una bassa senza azionare niente non è un problema. Di solito succede spontaneamente: lasciamo semplicemente "scivolare" l'entropia in un conduttore, dalla temperatura alta a quella bassa (vedi anche il paragrafo 11.3). Ma l'energia che avremmo voluto trasferire al portatore di energia utile, per esempio la quantità di moto angolare, se ne va interamente con l'entropia prodotta. Viene sprecata.

Come facciamo allora a portare l'entropia dalla temperatura alta a quella bassa senza produrre ulteriore entropia? Da quando conosciamo le proprietà termiche dei gas, per noi non è più un problema. La fig. 13.10 mostra come fare.

Si fornisce entropia a un gas compresso e poi lo si lascia espandere. Secondo la linea (3b) in fig. 13.9 la temperatura diminuisce e contemporaneamente il pistone viene spinto fuori. L'energia scaricata dall'entropia se ne va con l'asta del pistone, per esempio a una manovella che fa ruotare un albero.

In un motore termico un gas viene lasciato espandere. Così facendo la pressione e la temperatura del gas diminuiscono e il gas cede energia.

Questo è il principio che sta alla base di tutti i motori termici. C'è però un gran numero di realizzazioni tecniche diverse di questo principio: la macchina a vapore, la turbina a vapore, il motore a scoppio, il motore diesel, il motore a reazione e molte altre ancora.

Analizziamo più da vicino due di queste macchine: dapprima le macchine a vapore, poiché nel passato hanno avuto un ruolo importante; poi il motore a

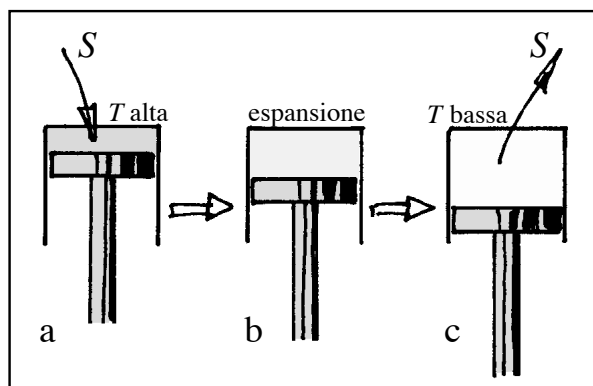


Fig. 13.10. Principio di funzionamento dei motori termici. (a) L'entropia viene fornita a un gas compresso. (b) Il gas si espande. La sua temperatura scende e cede energia. (c) L'entropia viene nuovamente ceduta a temperatura inferiore.

scoppio, perché aziona la maggior parte delle automobili.

La macchina a vapore

Il problema più grosso nel realizzare una macchina che lavori secondo il principio di fig. 13.10, sta nel riuscire a far entrare e uscire *in fretta* l'entropia dalla macchina. In nessun caso si procede come suggerito dalla fig. 13.10, cioè lasciando che l'entropia affluisca al cilindro per normale conduzione termica. Il processo sarebbe decisamente troppo lento. Conosciamo già un trucco per portare rapidamente entropia da un punto a un altro: per convezione. Ed è così che si fa anche nella macchine a vapore.

Prima si riscalda un gas al di fuori del cilindro e poi lo si conduce, assieme alla sua entropia, nel cilindro. Lì si espande e contemporaneamente cede energia al pistone. Poi, assieme alla sua entropia, lo lasciamo uscire nuovamente dal cilindro.

La fig. 13.11 mostra nel dettaglio come funziona una macchina a vapore. Il gas di lavoro utilizzato è il vapore acqueo. Il vapore è prodotto nella caldaia e in seguito *surriscaldato*. L'immissione e lo scarico del vapore sono regolati dalla *distribuzione a cassetto* (un sistema che permette di aprire e chiudere alternativamente le aperture sul fondo del cilindro). All'inizio il pistone è tutto a sinistra, immagine a. Da sinistra affluisce vapore molto caldo alla parte sinistra del cilindro. Dopo che il pistone si è mosso un po' verso destra, immagine b, il cassetto chiude l'immissione del vapore. Espandendosi, il vapore spinge il pistone verso destra, la pressione e la temperatura diminuiscono. Il pistone raggiunge il punto morto a destra, immagine c, e comincia a tornare indietro. Nel frattempo il cassetto ha aperto lo scarico del vapore. Il vapore espanso e raffreddato viene spinto all'aperto assieme alla sua entropia.

Lo stesso processo si ripete nella parte destra del cilindro. Il vapore nella parte destra spinge il pistone verso sinistra.

Le diverse parti di una macchina a vapore di questo tipo sono facilmente riconoscibili su una locomotiva, fig. 13.12.

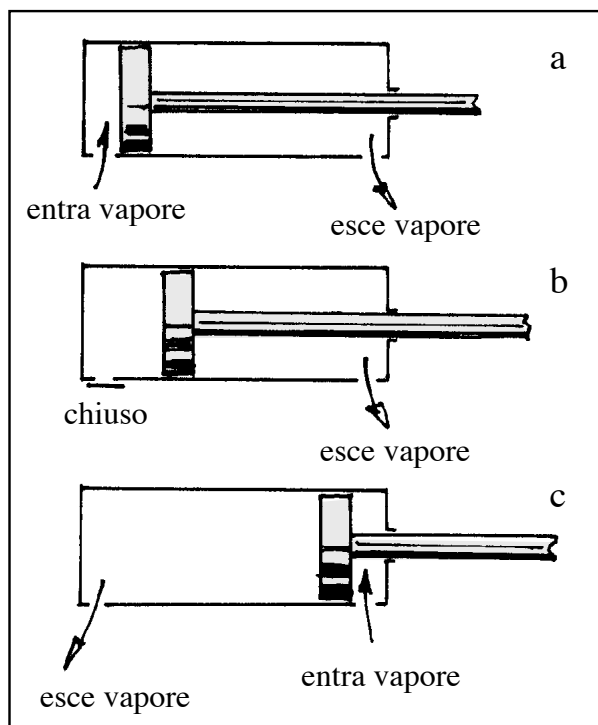


Fig. 13.11. Macchina a vapore in tre diversi istanti.

Il motore a scoppio

In questo caso il trucco per avere subito a disposizione entropia nel cilindro, consiste nel produrre l'entropia nel cilindro stesso mediante combustione di una miscela di benzina in forma gassosa e aria. La combustione avviene in maniera esplosiva, vale a dire molto in fretta.

Quindi si deve prima riempire il cilindro con la miscela infiammabile aria-benzina, e anche fare in modo che il pistone sia spinto in fondo al cilindro. Per farlo si lascia che il motore, per una rotazione, lavori come pompa.

Ogni mezza rotazione dell'albero motore viene detta *fase*. Caricare il motore, vale a dire pompare, dura quindi due fasi: durante la *fase di aspirazione* la miscela aria-benzina viene risucchiata nel cilin-

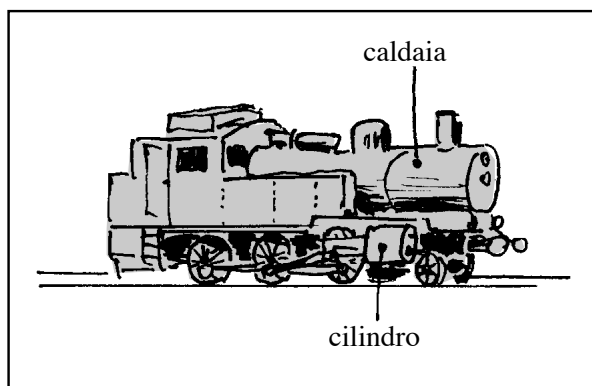


Fig. 13.12. Locomotiva a vapore.

dro, fig. 13.13, immagine a. Nella *fase di compressione* viene compresso, immagine b. Il pistone ora è nel punto morto superiore ed è pronto a lavorare, immagine c. Con l'aiuto di una scintilla elettrica prodotta dalla candela, la miscela aria-benzina prende fuoco. Brucia istantaneamente. Nella combustione viene prodotta entropia, la temperatura e la pressione aumentano notevolmente. Ora il gas caldo spinge il pistone verso il basso. Intanto la temperatura e la pressione diminuiscono. Questa è la *fase di lavoro*, immagine d. Poi, nella *fase di scarico*, i gas di scarico con la loro entropia sono spinti nello scappamento, immagine e.

Si può notare che un motore monocilindrico come questo lavora solo un quarto del tempo, cioè nella fase di lavoro. Durante le altre fasi continua sullo slancio. Un motore a scoppio gira "più rotondo" se ha più cilindri che si alternano al lavoro. La maggior parte delle auto ha un motore a quattro cilindri. Quando un motore del genere è acceso, in ogni momento uno dei cilindri è nella fase di lavoro.

Un motore a scoppio possiede una serie di strumenti ausiliari:

- il carburatore; qui la benzina viene vaporizzata e mescolata all'aria;
- la pompa della benzina; porta la benzina dal serbatoio al carburatore;

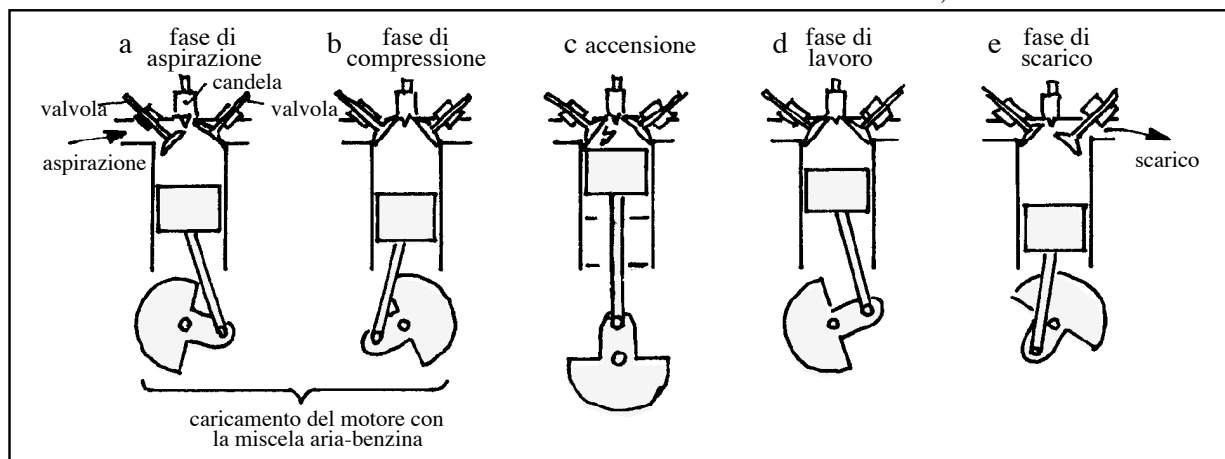


Fig. 13.13. Motore a scoppio in cinque diversi istanti del suo ciclo.

- bobina di accensione e ruttore; generano l'elevata tensione elettrica necessaria per le scintille;
- lo spinterogeno; distribuisce di volta in volta l'alta tensione alla candela giusta.

Esercizi

1. Immagina che la "sostanza di lavoro" del motore termico in fig. 13.10 sia un liquido invece di un gas. Il motore funzionerebbe? Motiva!
2. Un motore diesel è costruito in modo molto simile a un motore a scoppio. Una differenza: non ha le candele. La miscela carburante-aria prende fuoco da sola. Come è possibile?
3. Invece di chiudere il rifornimento di vapore al cilindro di una macchina a vapore dopo che il pistone si è spostato verso destra, potremmo lasciarlo aperto finché il pistone è completamente a destra. La macchina sarebbe allora più potente, cedrebbe più energia. Nelle locomotive a vapore questa modalità di funzionamento era possibile. Era usata per la partenza e per le salite. Che svantaggi ha?

13.4 Perché l'aria più in alto sopra la superficie terrestre è più fredda?

Su in alta montagna è più freddo che giù a valle. Più in alto saliamo, più scende la temperatura. Per ogni 100 m di aumento di altitudine scende di circa $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Molto spesso sugli aerei il comandante annuncia l'impressionante basso valore della temperatura esterna. Per un aereo che vola a 10 000 m di quota sono circa $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Come si spiegano temperature così basse? La differenza di temperatura tra sopra e sotto non dovrebbe annullarsi? Come sappiamo, l'entropia scorre dalle temperature più alte a quelle più basse. C'è però un ostacolo. L'entropia scorre solo se la resistenza alla corrente non è troppo grande. E l'aria è notoriamente un buon materiale isolante. Pochi millimetri d'aria tra i cristalli di una finestra a doppi vetri sono già molto efficaci. Tra la parte superiore e quella inferiore dell'atmosfera terrestre c'è una strato d'aria spesso alcuni chilometri. Di conseguenza un riequilibrio delle temperature per conduzione termica è praticamente impossibile.

Ma come nasce questa differenza di temperatura? Per capirlo dobbiamo scomodare le nostre conoscenze delle proprietà termiche dei gas. L'aria dell'atmosfera terrestre è in continuo movimento. Il perché lo vedremo nel prossimo paragrafo. Per il momento immaginiamo semplicemente che qualcuno rimesti l'aria in continuazione.

Consideriamo una determinata porzione d'aria che si sta muovendo verso il basso. Visto che la pressione in basso è maggiore, si contrae. Ma il contenuto di entropia della porzione d'aria non cambia e secondo la linea (3a) in fig. 13.9, la sua temperatura deve aumentare.

A una porzione d'aria che si sta muovendo verso l'alto succede esattamente il contrario: la sua temperatura diminuisce.

Quindi, la temperatura di un determinato pacchetto d'aria con un determinato contenuto di entropia, cambia se lo si muove su e giù. In alto è più freddo, in basso più caldo. A ogni altitudine corrisponde una temperatura.

13.5 La convezione termica

L'aria calda sale, come tutti sanno. Ma perché? Per noi, che ormai siamo esperti di proprietà termiche dei gas, spiegarlo risulta facile. Consideriamo il calorifero di un riscaldamento centrale. L'aria nei pressi del calorifero si riscalda, si espande (vedi paragrafo 13.2). In questo modo la sua densità diventa inferiore a quella dell'aria non riscaldata che la circonda. Quindi l'aria calda sale (vedi paragrafo 4.8). Così l'essenziale è spiegato.

Alla nostra aria però, dopo essere salita, succede dell'altro: cede in continuazione entropia all'aria più fredda che ha attorno e agli oggetti presenti nel locale e intanto si raffredda nuovamente. La sua densità torna ad aumentare e viene scacciata dall'aria appena riscaldata che sale: scorre verso il basso e va a sostituire l'aria calda che è salita. In breve: si forma un circuito, fig. 13.14. Un processo del genere, dove una corrente scorre in continuazione, viene detto *convezione termica*.

La convezione termica è responsabile di molti trasporti di entropia in natura e nella tecnica. Un esempio è già stato discusso: la convezione termica fa sì che l'entropia ceduta dai caloriferi sia ripartita in tutto il locale.

La convezione termica gioca un ruolo importante anche nella formazione del vento. Alcuni venti nascono in modo molto complicato, ma in altri casi ci troviamo di fronte a una semplice convezione termica.

Un esempio è il *vento di mare*. È il vento che soffia sulla costa durante il giorno, dal mare verso terra. La radiazione solare fa salire molto la temperatura

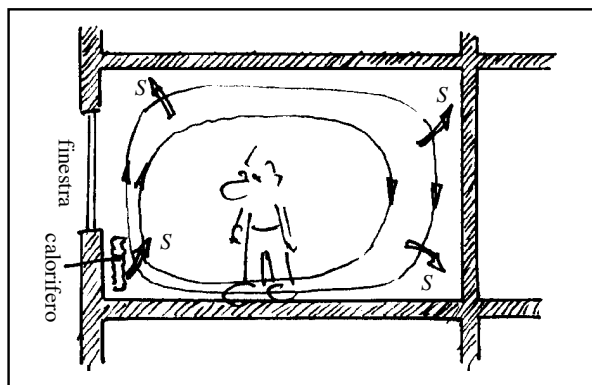


Fig. 13.14. Correnti di convezione termica in un locale riscaldato.

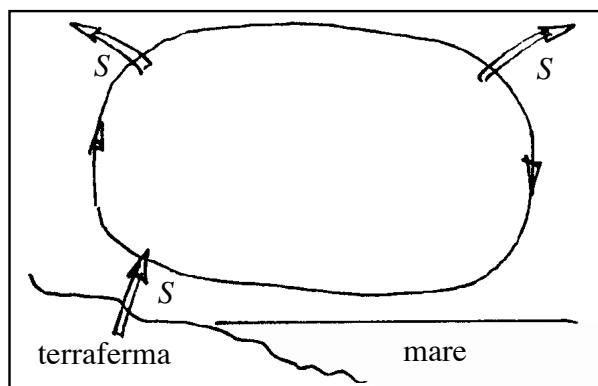


Fig. 13.15. Il suolo è riscaldato molto dal Sole, il mare molto debolmente. Si forma una corrente di convezione.

della terraferma, poco quella dell'acqua (perché nell'acqua l'entropia si distribuisce su una profondità molto maggiore). L'aria sopra la terraferma si espande, diminuisce la sua densità e sale, fig. 13.15. Dal mare, sopra il quale l'aria non si espande, scorre l'aria in direzione della terraferma. Giunta ad alcune centinaia di metri di altitudine, l'aria della terraferma scorre verso il mare e, giunta sopra il mare, ridiscende. La superficie terrestre riscaldata dal Sole corrisponde al calorifero nell'esempio di correnti convettive visto in precedenza.

Differenze di temperatura che causano differenti riscaldamenti dell'aria non sussistono unicamente tra mare e terraferma, ma anche tra molti altri punti della superficie terrestre.

Quando un punto della Terra è più caldo dei suoi dintorni immediati, si formano sempre delle correnti ascendenti, quando è più freddo delle correnti discendenti.

Le correnti ascendenti che si formano nei punti caldi (le cosiddette termiche) sono spesso sfruttate dagli uccelli e dagli alianti per prendere quota.

Anche gli alisei sono un esempio di corrente convettiva termica, fig. 13.16. Vicino all'equatore l'aria viene riscaldata fortemente. Sale, e in altitudine scorre verso sud e verso nord, cioè verso regioni più fredde. Attorno al 30° grado di latitudine (nord e sud) ridiscende e torna all'equatore scorrendo a bassa quota. Questa corrente che scorre in direzione dell'equatore è l'aliseo.

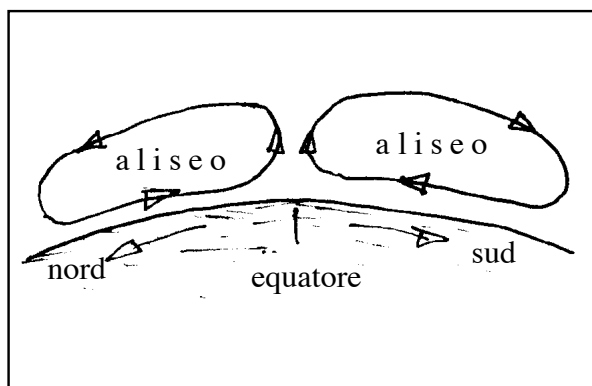


Fig. 13.16. Sulla formazione degli alisei.

Vogliamo considerare la convezione termica da un ulteriore punto di vista. L'aria assorbe entropia a bassa altitudine e sale. Salendo, la temperatura dell'aria scende poiché la sua densità diminuisce. Poi continua a cedere entropia, in quanto la sua temperatura è sempre più alta di quella dell'ambiente in cui si trova di volta in volta. Però cede l'entropia a una temperatura più bassa di quando l'ha assorbita.

Quindi all'aria succede ciò che succede al gas di lavoro in un motore termico: assorbimento di entropia a temperatura elevata, cessione a temperatura bassa. Di conseguenza possiamo interpretare ogni corrente convettiva termica come un motore termico. Non uno che fa ruotare un albero ma uno che fa muovere l'aria.

Infine, si estrae spesso l'energia dall'aria in movimento: nei mulini a vento, nelle turbine eoliche e nelle barche a vela. Dalla corrente convettiva in un locale si può estrarre energia per esempio con una girandola natalizia.

Esercizi

1. Un liquido a cui si fornisce entropia si dilata molto poco. Questa dilatazione è comunque sufficiente per mettere in moto correnti convettive. Fai un esempio. In che punto viene fornita entropia al liquido, da che punto gli viene tolta?
2. Perché la fiamma di una candela va verso l'alto, vista dallo stoppino, e non verso il basso?