

Der Karlsruher Physikkurs



Volume 1

Energia
Quantità di moto
Entropia

Traduzione italiana - settembre 2006

Repubblica e Cantone Ticino
Dipartimento dell'educazione, della cultura e dello sport
Divisione della scuola / Centro didattico cantonale

Eduard-Job-Stiftung
für Thermo- und Stoffdynamik
D - Ahrensburg

Titolo originale dell'opera:

F. Herrmann

Der Karlsruher Physikkurs

Ein Lehrbuch für den Unterricht der Sekundarstufe I
Volume 1

Edizione italiana: settembre 2006

Redazione: Karen Haas, Prof. Friedrich Herrmann, Dr. Matthias Laukenmann,
Dr. Lorenzo Mingirulli, Dr. Petra Morawietz, Dr. Peter Schmäzle

Traduzione: Paolo Pianezzi

Disegni : F. Herrmann

www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de
www.scuoladecs.ti.ch

Indice

ENERGIA

1. Energia e portatori di energia	9
1.1 L'energia	9
1.2 Sorgenti di energia e ricevitori di energia	10
1.3 Trasferitori di energia	12
1.4 L'intensità della corrente di energia	13

CORRENTI

2. Correnti di liquidi e gas	17
2.1 La pressione	17
2.2 Pressione atmosferica, sovrappressione, vuoto	17
2.3 La differenza di pressione come spinta di una corrente di liquidi o di gas	18
2.4 Le pompe	19
2.5 L'intensità della corrente	19
2.6 Intensità di corrente e spinta	20
2.7 Intensità di corrente e resistenza	21
2.8 Trasmissione idraulica di energia	22

QUANTITÀ DI MOTO

3. Quantità di moto e correnti di quantità di moto	25
3.1 Grandezze fisiche	25
3.2 Quantità di moto e velocità	26
3.3 Pompe di quantità di moto	30
3.4 Conduttori e non conduttori di quantità di moto	31
3.5 Propulsori e freni	33
3.6 Equilibri dinamici	35
3.7 La direzione delle correnti di quantità di moto	35
3.8 Compressione e trazione	36
3.9 Circuiti di quantità di moto	37
3.10 L'intensità della corrente di quantità di moto	39
3.11 La forza	40
3.12 Misurazione dell'intensità della corrente di quantità di moto	41
3.13 Le correnti di quantità di moto possono distruggere	43
3.14 La velocità	44
3.15 La relazione tra quantità di moto, massa e velocità	45
3.16 Unità SI	48

4. Il campo gravitazionale	49
4.1 Il moto verticale	49
4.2 L'attrazione terrestre - il campo gravitazionale	49
4.3 Da cosa dipende l'attrazione terrestre	50
4.4 La caduta libera	51
4.5 La caduta con attrito	52
4.6 L'assenza di peso	54
4.7 La densità delle sostanze	56
4.8 Quando un corpo galleggia e quando affonda	57
4.9 La relazione tra pressione e altezza nei liquidi e nei gas	58
5. Quantità di moto e energia	59
5.1 La quantità di moto come portatore di energia	59
5.2 Contenitori meccanici di energia	61
5.3 I percorsi tortuosi dell'energia e della quantità di moto	63
6. La quantità di moto come vettore	65
6.1 I vettori	65
6.2 La direzione della corrente e la direzione di ciò che scorre	66
6.3 L'addizione di vettori	69
6.4 Satelliti, Luna e pianeti	71
6.5 Ruote	72
6.6 Corde	74
6.7 La regola dei nodi per le correnti di quantità di moto	75
7. Momento meccanico e baricentro	77
7.1 Carrucole e paranchi	77
7.2 Il bilancio energetico per il paranco	80
7.3 La legge della leva	81
7.4 Equilibrio	85
7.5 Il baricentro	86
7.6 L'equilibrio stabile	88
7.7 Baricentro e energia	89
8. Quantità di moto angolare e correnti di quantità di moto angolare	93
8.1 Quantità di moto angolare e velocità angolare	93
8.2 Pompe di quantità di moto angolare	95
8.3 Il volano	96
8.4 Conduttori di quantità di moto angolare	97
8.5 Circuiti di quantità di moto angolare	99
8.6 La quantità di moto angolare come portatore di energia	100
9. Compressione e trazione	101
9.1 La relazione tra pressione e intensità della corrente di quantità di moto	101
9.2 Tensione in tre direzioni	102
9.3 La pressione nei liquidi e nei gas	104
9.4 La densità	105
9.5 La pressione gravitazionale	105

9.6	Recipienti più complessi	107
9.7	La spinta idrostatica	108
9.8	Trazione nei gas e nei liquidi	110
9.9	Trasporto idraulico di energia	112

ENTROPIA

10. Entropia e correnti di entropia	117
10.1 Entropia e temperatura	117
10.2 La differenza di temperatura come spinta di una corrente di entropia	118
10.3 La pompa di calore	120
10.4 La temperatura assoluta	121
10.5 Produzione di entropia	122
10.6 L'intensità della corrente di entropia	124
10.7 La resistenza termica	125
10.8 Trasporto di entropia per convezione	127
11. Entropia e energia	129
11.1 L'entropia come portatore di energia	129
11.2 La relazione tra corrente di energia e corrente di entropia	130
11.3 Produzione di entropia per mezzo di correnti di entropia	131
11.4 I motori termici	133
11.5 Le sorgenti di entropia per i motori termici	134
11.6 Le perdite di energia	135
11.7 La relazione tra contenuto di entropia e temperatura	137
11.8 La relazione tra apporto di energia e variazione di temperatura	138
12. Transizioni di fase	141
12.1 Transizioni di fase	141
12.2 Bollire e evaporare	142
12.3 Transizioni di fase in natura e nella tecnica	143
13. I gas	145
13.1 Gas e sostanze condensate	145
13.2 Le proprietà termiche dei gas	146
13.3 Il funzionamento dei motori termici	148
13.4 Perché l'aria più in alto sopra la superficie terrestre è più fredda?	150
13.5 La convezione termica	150
14. La luce	153
14.1 Trasporto di entropia attraverso lo spazio privo d'aria	153
14.2 Tipi di luce	153
14.3 Trasporto di entropia e di energia con la luce	154
14.4 La temperatura della luce	155
14.5 Bilancio entropico e bilancio energetico della Terra	155
14.6 L'effetto serra	156
Indice analitico	159

E n e r g i a

1. Energia e portatori di energia

1.1 L'energia

Le automobili vanno a benzina, le locomotive diesel a gasolio, le locomotive elettriche a elettricità. Ogni veicolo ha bisogno di un carburante - ma non solo ogni veicolo. Anche per andare a piedi o in bicicletta ci vuole carburante: la persona che cammina o che pedala consuma del cibo. Tutti questi "carburanti" hanno una cosa in comune: grazie a loro il veicolo, rispettivamente la persona, riceve energia. L'energia è ciò di cui si ha veramente bisogno per il trasporto.

L'energia ha a che fare con lo sforzo. Se trasciniamo una macchina, facciamo uno sforzo. Per farlo abbiamo bisogno di energia. Mentre tiriamo, spendiamo energia nella macchina.

Per muovere qualcosa ci vuole energia.

Ma non solo per muoversi ci vuole energia. Molti altri processi accadono solamente se c'è un apporto continuo di energia.

Per riscaldare ci vuole sempre un qualche combustibile: legna, carbone, gas naturale, olio combustibile o elettricità. Anche qui ciò che conta è l'energia che viene fornita con il "combustibile".

Per riscaldare ci vuole energia.

Chiamiamo *portatori di energia* quei carburanti o combustibili grazie ai quali l'energia arriva al motore o alla stufa. Legna, carbone, benzina, gasolio, gas naturale e elettricità sono dei portatori di energia.

Dipende solo dall'energia se possiamo muovere o riscaldare qualcosa. Che portatore utilizziamo è spesso secondario. Ma allora non si potrebbe parlare di energia senza introdurre il portatore? Forse sarebbe più comodo ma purtroppo non si può, in quanto non c'è energia senza portatore.

Carburanti, combustibili, alimenti e elettricità, sono portatori di energia. Non c'è energia senza portatore.

L'energia è una grandezza fisica. Cosa vuol dire? Esattamente come a una lunghezza, un intervallo di tempo o una temperatura, possiamo associarle un numero e, esattamente come lunghezza, tempo e temperatura, anche l'energia ha la sua unità di misura. L'unità di misura dell'energia è il joule, abbreviato in J. Grandi quantità di energia si misurano in chilojoule (kJ) o in megajoule (MJ):

viato in J. Grandi quantità di energia si misurano in chilojoule (kJ) o in megajoule (MJ):

$$1 \text{ kJ} = 1000 \text{ J}$$

$$1 \text{ MJ} = 1000 \text{ kJ}.$$

Come per le altre grandezze fisiche, anche per l'energia si usa un simbolo. Così come la lunghezza è rappresentata con la lettera l e il tempo con la t , l'energia è abbreviata in E . Se la benzina contenuta nel serbatoio di un'auto contiene un quantitativo di energia di 800 megajoule, allora possiamo scrivere:

$$E = 800 \text{ MJ}.$$

Non confondere il simbolo E dell'energia con il simbolo J della sua unità di misura.

Di un combustibile possiamo dire che un kg contiene tot joule, tabella 1.1. Il contenuto energetico di un alimento è spesso stampato sulla confezione. Una batteria piatta carica contiene circa 10 kJ, una batteria d'auto carica circa 2000 kJ - più o meno come una tavoletta di cioccolato. La locomotiva di un treno merci ha bisogno di circa 10 000 MJ all'ora, un orologio da polso digitale 0,1 J.

Per misurare l'energia si ricorre a procedimenti diversi a seconda del portatore coinvolto. Per determinare il consumo energetico di un'auto si deve solamente misurare il quantitativo di benzina consumata (in kg) e moltiplicarlo con il corrispondente valore indicato nella Tab. 1.1. L'energia che giunge elettricamente in una casa è misurata dal cosiddetto contatore elettrico.

Tabella 1.1. Contenuto energetico di alcuni combustibili

carbone fossile	30 000	kJ al kg
bricchetta	20 000	kJ al kg
legna fresca	8 000	kJ al kg
propano	46 000	kJ al kg
olio combustibile	42 000	kJ al kg
benzina	43 000	kJ al kg

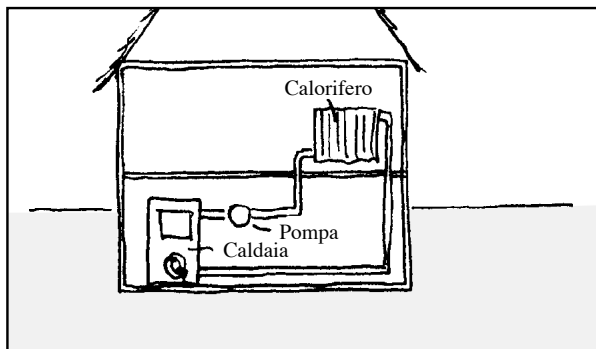


Fig. 1.1. L'energia va dalla caldaia al calorifero, con il portatore "acqua calda".

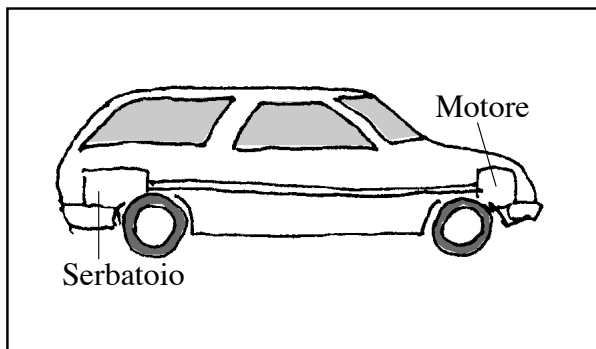


Fig. 1.2. L'energia giunge al motore dal serbatoio, con il portatore benzina.

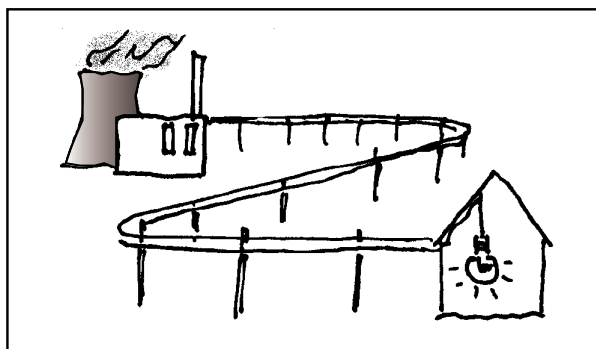


Fig. 1.3. L'energia arriva alla lampadina dalla centrale, con il portatore elettricità.

1.2 Sorgenti di energia e ricevitori di energia

La fig. 1.1 mostra il dettaglio di un impianto di riscaldamento centrale. L'acqua calda viene pompata nei tubi fino ai singoli caloriferi. In fig. 1.1 è rappresentato un solo calorifero. Chiamiamo la caldaia *sorgente di energia* e il calorifero *ricevitore di energia*. Il motore dell'auto in fig. 1.2 riceve la sua energia dal serbatoio con la benzina come portatore. In questo caso la sorgente di energia è il serbatoio, il ricevitore di energia è il motore. L'energia per la lampadina in fig. 1.3, arriva da una centrale elettrica con il portatore elettricità. La centrale elettrica è la sorgente di energia, la lampadina il ricevitore di energia.

Quando da qualche parte fluisce energia (ovviamente sempre con un portatore) si può sempre dire

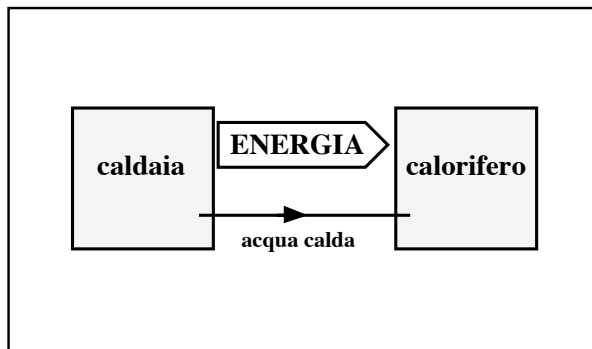


Fig. 1.4. Diagramma di flusso dell'energia per la fig. 1.1

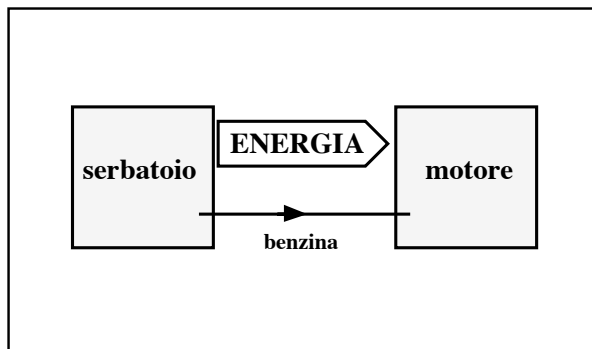


Fig. 1.5. Diagramma di flusso dell'energia per la fig. 1.2

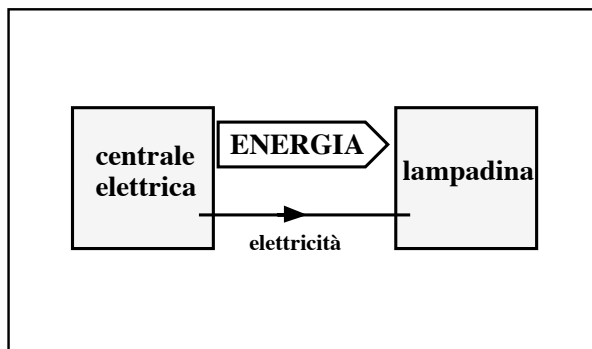


Fig. 1.6. Diagramma di flusso dell'energia per la fig. 1.3

qual è la sorgente e qual è il ricevitore di energia. Se si risale il percorso dell'energia partendo dal ricevitore, si giunge alla sorgente. Se si parte dalla sorgente e si segue il suo percorso fino alla fine, si giunge al ricevitore.

I processi rappresentati nelle figg. 1.1-1.3 hanno qualcosa in comune: in ogni situazione, l'energia, con il suo portatore, fluisce da una sorgente a un ricevitore. Se non ci occupiamo dei dettagli, se vogliamo esprimere ciò che gli apparecchi e gli impianti descritti hanno in comune, è opportuno rappresentarli in simboli i processi, come fatto nelle figg. 1.4-1.6. Le sorgenti e i ricevitori di energia sono rappresentati come delle scatole. Le scatole sono collegate da frecce spesse per l'energia e da frecce sottili per i portatori di energia. Chiamiamo queste illustrazioni simboliche *diagrammi di flusso dell'energia*.

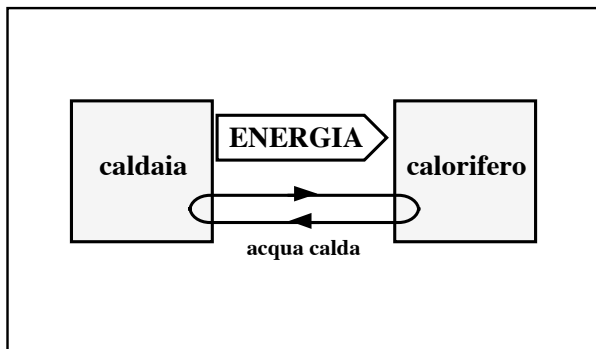


Fig. 1.7. Diagramma di flusso completo, per la fig. 1.1

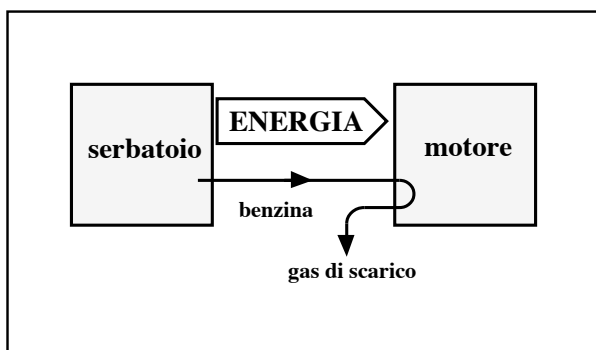


Fig. 1.8. Diagramma di flusso completo, per la fig. 1.2

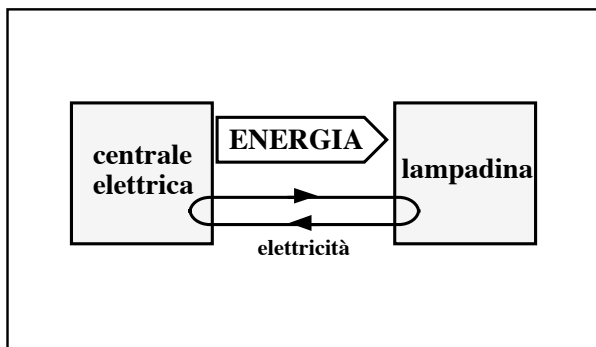


Fig. 1.9. Diagramma di flusso completo, per la fig. 1.3

Completiamo le figg. 1.4-1.6 con un'aggiunta. Il portatore di energia giunge dalla sorgente al ricevitore con l'energia. Dopo avere scaricato la sua energia, solitamente lascia il ricevitore, come rappresentato nelle figg. 1.7-1.9. Puoi notare che al portatore di energia non succede sempre la stessa cosa dopo che ha lasciato il ricevitore.

Nel caso del riscaldamento centrale viene riportato alla sorgente. L'acqua giunge al calorifero attraverso la tubazione, cede energia al locale da riscaldare e così facendo si raffredda. Continua poi nella tubazione, tornando alla caldaia per essere nuovamente riscaldata. L'acqua viene quindi riutilizzata. È come per una bevanda venduta in bottiglie con deposito. Una volta vuota, la bottiglia torna alla fabbrica per essere riempita di nuovo. Vogliamo quindi definire l'acqua di un impianto di riscaldamento centrale *portatore d'energia del tipo "vuoto a rendere"*.

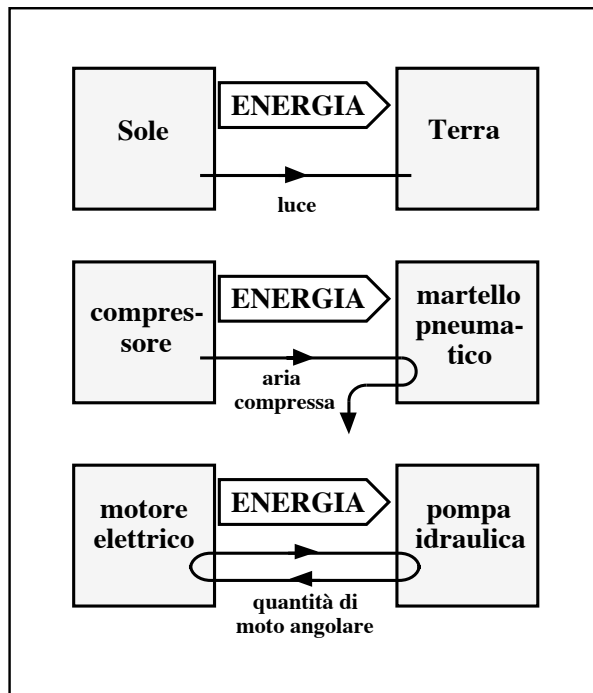


Fig. 1.10. Alcuni diagrammi di flusso dell'energia

Il trasporto di energia descritto in fig. 1.8 è diverso. La benzina brucia nel motore e si trasforma in gas di scarico. I gas di scarico ovviamente non sono ricondotti al serbatoio. Escono dallo scappamento, vengono "gettati via", come una bottiglia con il vetro a perdere. Definiamo la benzina *portatore di energia del tipo "vuoto a perdere"*.

Questi due tipi di portatore di energia sono facilmente distinguibili. Visto che i portatori del tipo "vuoto a rendere" circolano in un circuito chiuso, ci sono sempre *due* condutture che collegano sorgente e ricevitore. Nel caso dei portatori del tipo "vuoto a perdere" per contro c'è *una* sola conduttura.

L'elettricità deve essere un portatore del tipo "vuoto a rendere", visto che in un cavo elettrico ci sono due fili, fig. 1.9.

A volte non è facile decidere se si ha a che fare con un portatore del tipo "vuoto a rendere" o del tipo "vuoto a perdere".

Un portatore di energia che non abbiamo ancora citato è la luce. Trasporta per esempio l'energia dal Sole alla Terra, fig. 1.10. Il ricevitore non ha un'uscita per la luce. La luce è di conseguenza un portatore del tipo "vuoto a perdere". Maggiori dettagli più avanti.

Esattamente come l'acqua calda che trasporta energia dalla caldaia ai caloriferi, anche l'aria calda trasporta energia. L'impianto di riscaldamento di un'auto sfrutta questa possibilità.

Un martello pneumatico per funzionare deve essere collegato a un compressore. Riceve la sua energia dal compressore. In questo caso il portatore di energia, del tipo "vuoto a perdere", è l'aria compressa.

Anche liquidi in pressione possono essere usati come portatori di energia: una turbina idraulica riceve la sua energia dall'acqua ad alta pressione. Il cucchiaio e il braccio di una scavatrice ricevono la loro energia dall'olio idraulico in pressione.

L'aria e l'acqua possono fare da portatore di energia anche senza essere calde o in pressione. È sufficiente che si muovano velocemente. Un mulino a vento riceve energia con il portatore "aria in movimento".

Quando un motore aziona una qualsiasi macchina, per esempio una pompa idraulica con un albero rotore, dal motore alla macchina fluisce energia. Il portatore grazie al quale l'albero trasmette energia, si chiama quantità di moto angolare. La quantità di moto angolare è un portatore del tipo "vuoto a rendere": rifluisce dalla macchina al motore attraverso il supporto su cui entrambi sono montati. Anche su questo avrai maggiori dettagli più avanti.

Nella tabella 1.2 sono elencati nuovamente tutti questi portatori di energia.

Esercizi

1. Cita tre diversi ricevitori di energia che sfruttano il portatore elettricità.
2. Cita tre diverse sorgenti di energia che cedono energia con il portatore quantità di moto angolare.
3. Cita tre portatori di energia del tipo "vuoto a rendere" e tre del tipo "vuoto a perdere".

1.3 Trasferitori di energia

Alcune delle sorgenti di energia che abbiamo elencato sono fatte in modo da non svuotarsi mai: ricevono continuamente nuova energia - però con un altro portatore. Sono sorgenti di energia con un portatore A e ricevitori di energia con un portatore B. Così, la caldaia di un impianto di riscaldamento centrale riceve energia con il portatore "olio combustibile" e la cede con il portatore "acqua calda". Diciamo: nella caldaia l'energia viene trasferita dal portatore "olio combustibile" al portatore "acqua calda", la caldaia è un *trasferitore di energia*.

Tabella 1.2. Portatori di energia

carburanti, combustibili, alimenti
elettricità
luce
quantità di moto angolare
acqua calda, aria calda
acqua e aria in pressione
acqua in movimento, aria in movimento

Allo stesso modo, nel motore di un'automobile l'energia viene trasferita dalla benzina alla quantità di moto angolare e in una lampadina viene trasferita dall'elettricità alla luce. In fig. 1.11 sono rappresentati simbolicamente alcuni trasferitori di energia e la tabella 1.3 contiene una lista più lunga di trasferitori di energia, con i rispettivi portatori in entrata e in uscita.

Per ogni apparecchio che trasferisce energia da un portatore A a un portatore B, se ne può trovare un altro che fa esattamente l'opposto, cioè che trasferisce energia dal portatore B al portatore A. In un motore elettrico l'energia viene trasferita dal portatore elettricità al portatore quantità di moto angolare, nel generatore passa dalla quantità di moto angolare all'elettricità. C'è lo stesso legame tra una lampadina e una cellula solare o una turbina idraulica e una pompa idraulica.

Spesso l'energia viene trasferita da un portatore all'altro più volte di seguito. La fig. 1.12 mostra una lampadina alimentata da una centrale idroelettrica.

Se si attaccano due trasferitori di energia l'uno all'altro, il portatore che esce dal primo deve essere lo stesso che entra nel secondo. La regola che permette di concatenare i trasferitori di energia è uguale alla regola del gioco del domino.

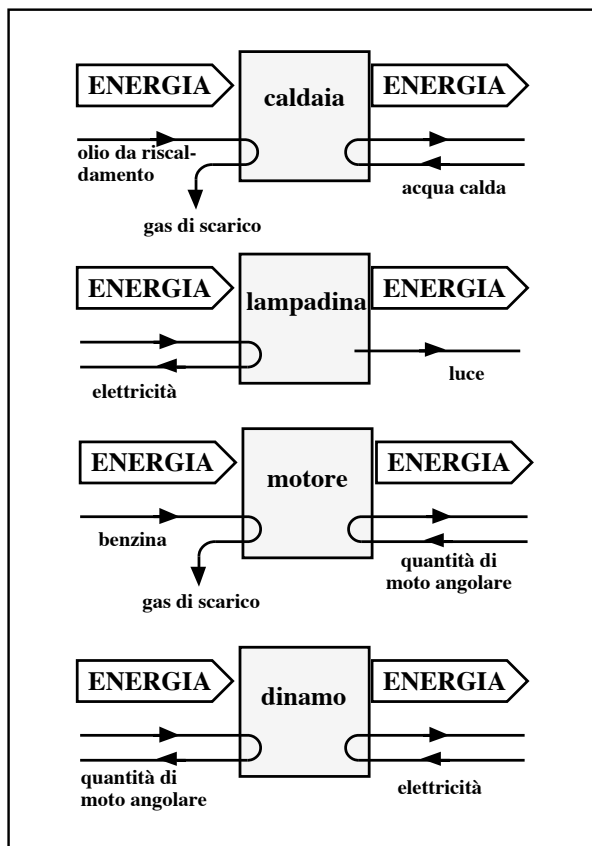


Fig. 1.11. Trasferitori di energia

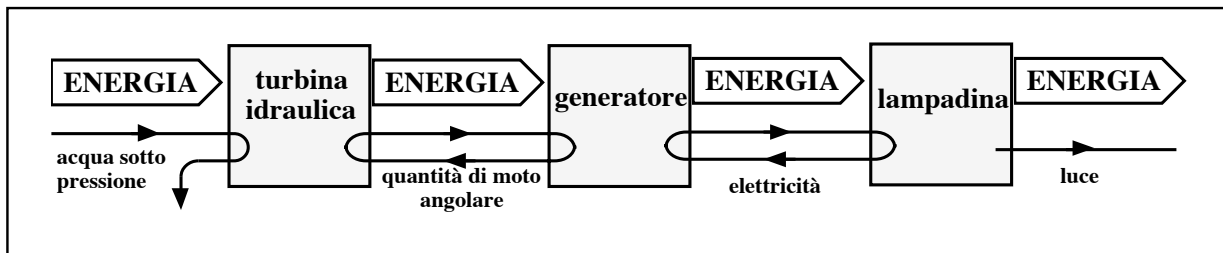


Fig. 1.12. Trasporto di energia durante il quale l'energia viene trasferita tre volte

Esercizi

1. In fig. 1.13 mancano i nomi dei portatori di energia in entrata e in uscita dal trasferitore. Completa la figura.
2. Completa la fig. 1.14 con i nomi dei trasferitori di energia.
3. Disegna una catena di trasferitori che coinvolga almeno tre trasferitori di energia.
4. Alcuni apparecchi possono essere rappresentati in modi diversi con i simboli per trasferitori. Un aspirapolvere può essere considerato un solo trasferitore e rappresentato da un unico simbolo, oppure con due simboli concatenati. Dai entrambe le rappresentazioni.

5. Perché un mulino a vento possa far funzionare una lampadina ci vuole un apparecchio supplementare. Quale? Disegna il diagramma di flusso.
6. L'apparecchio 1 carica energia dal portatore A al portatore B. L'apparecchio 2 fa esattamente il contrario, carica energia dal portatore B al portatore A. Trova tre coppie di trasferitori di energia con queste caratteristiche.

Tabella 1.3. Trasferitori di energia con i rispettivi portatori in entrata e in uscita

Trasferitore di energia	portatore in entrata	portatore in uscita
motore elettrico	elettricità	q. di moto angolare
lampadina	"	luce
stufetta elettrica	"	aria calda
scaldabagno	"	acqua calda
pompa elettrica	"	acqua in pressione
ventilatore	"	aria in movimento
compressore diesel	combustibile	aria compressa
centrale a carbone	"	elettricità
motore a benzina	"	q. di moto angolare
lampada a petrolio	"	luce
stufa a olio	"	aria calda
caldaia	"	acqua calda
cella solare	luce	elettricità
radiometro	"	q. di moto angolare
collettore solare	"	acqua calda
bosco	"	legno
compressore	quantità di moto angolare	aria compressa
pompa idraulica	"	acqua in pressione
dinamo, generatore	"	elettricità
elica	"	aria in movimento
turbina idraulica	acqua sotto pressione	quantità di moto angolare
mulino a vento	aria in movimento	quantità di moto angolare

1.4 L'intensità della corrente di energia

Per valutare il consumo di energia di un apparecchio, ci si deve chiedere quanta energia vi è fluita in un intervallo di tempo predefinito. (Naturalmente l'energia deve poi uscire di nuovo). Un apparecchio in cui fluiscono 1000 J al secondo, "consuma" di più rispetto a un apparecchio in cui fluiscono 500 J al secondo.

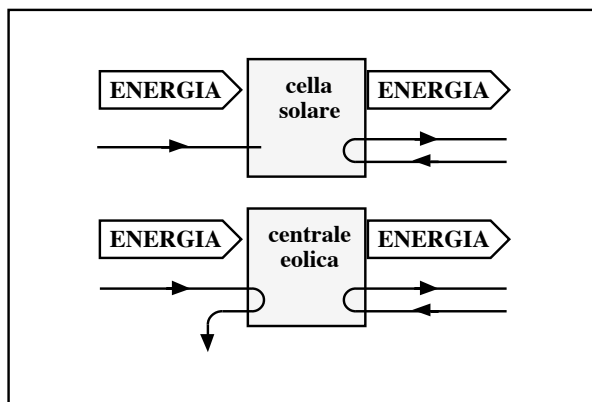


Fig. 1.13. Quali sono i portatori in entrata e in uscita?

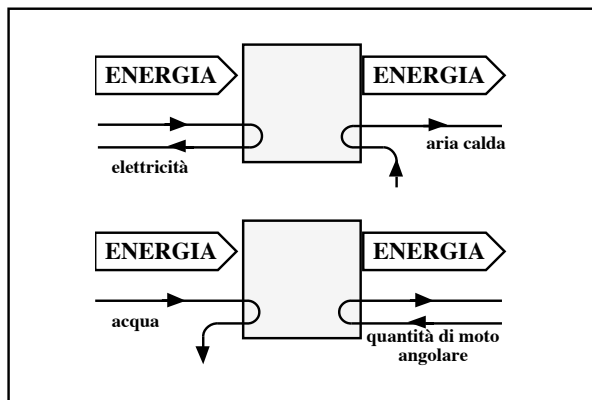


Fig. 1.14. Di quali trasferitori di energia si tratta?

Immaginati di sapere che un apparecchio usa 25 000 joule in 50 secondi. Come si calcola il consumo di energia al secondo? Dividendo l'energia totale di 25000 J per 50 s: in questo caso l'apparecchio ha bisogno di $25\,000\text{ J}/50\text{ s} = 500\text{ J/s}$.

La quantità di energia divisa per il tempo viene chiamata *intensità della corrente di energia* o più brevemente corrente di energia.

Intensità della corrente di energia = energia/tempo

Con le abbreviazioni E per l'energia, t per il tempo e P per l'intensità della corrente di energia si ottiene

$$P = \frac{E}{t}$$

Accanto a "corrente di energia", per indicare P si usa anche la parola "potenza". L'unità di misura della corrente di energia è joule/secondo, chiamato anche watt. In breve:

$$W = \text{J/s.}$$

In una comune lampadina fluisce una corrente di energia di 60 watt (con il portatore elettricità). Quindi:

$$P = 60\text{ W}$$

Dal motore di un'auto alle sue ruote (con il portatore quantità di moto angolare) fluiscono circa 50 kW.

Una grande centrale elettrica fornisce una corrente di energia (portata dall'elettricità) di 1000 MW. La corrente di energia solare che giunge sulla Terra, ha un'intensità pari a $1,7 \cdot 10^{11}$ MW; tanto quanto sarebbe prodotto da centosettanta milioni di grandi centrali elettriche. Mangiando, un uomo assorbe energia: l'uomo è quindi attraversato da una corrente di energia. In media questa corrente ha un'intensità di 100 W.

Ci sono sorgenti di energia che possono svuotarsi, per esempio la batteria di un'auto, la cella combustibile e il serbatoio della benzina. In questi apparecchi si può immagazzinare energia. Li chiamiamo *contenitori di energia*. Altri esempi di contenitore di energia sono il verricello a motore, il volano, il bacino di accumulazione, la stufa ad accumulazione, il serbatoio per l'olio combustibile, la vernice fosforescente e il Sole.

Esercizio

Su un asciugacapelli a due velocità si legge:

Livello 1 : 500 W

Livello 2 : 1000 W.

Qual è il significato di questa indicazione?

C o r r e n t i

2. Correnti di liquidi e gas

La maggior parte delle scavatrici, alcune gru e molte altre macchine sono azionate *idraulicamente*. Lo si può notare dai tubi che vanno da una pompa principale a quei punti dove si vuole muovere qualcosa.

Inoltre ci sono macchine e apparecchi azionati *pneumaticamente*, come il martello pneumatico. Il sistema di comando pneumatico funziona come quello idraulico, ma in questo caso il portatore di energia utilizzato è l'aria compressa.

In questo capitolo studieremo correnti di liquidi e di gas come quelle applicate alle macchine citate. Scopriremo delle semplici regole che varrà la pena annotarsi. Non valgono solo qui, cioè solo per correnti d'aria e d'acqua. Valgono, leggermente modificate, anche per altre e diverse correnti: per correnti elettriche, correnti di calore e cosiddette correnti di quantità di moto.

2.1 La pressione

Se apriamo un rubinetto al massimo, il getto d'acqua è molto forte, fig. 2.1. Il motivo è che l'acqua nella condotta ha una pressione alta. Se apriamo la valvola di un pneumatico d'auto o di bicicletta, l'aria esce sibilando. Il motivo è che l'aria nel pneumatico ha una pressione alta.

Esattamente come peso, lunghezza e energia, anche la pressione è una grandezza fisica. L'unità di misura della pressione è il *bar*. Gli apparecchi che misurano la pressione sono detti *manometri*, fig. 2.2. Nella tabella 2.1 sono elencati alcuni valori tipici di pressione.

Oltre al bar si usa un'altra unità di misura per la pressione: il pascal, abbreviato in Pa. Vale la relazione:

$$1 \text{ bar} = 100\,000 \text{ Pa.}$$

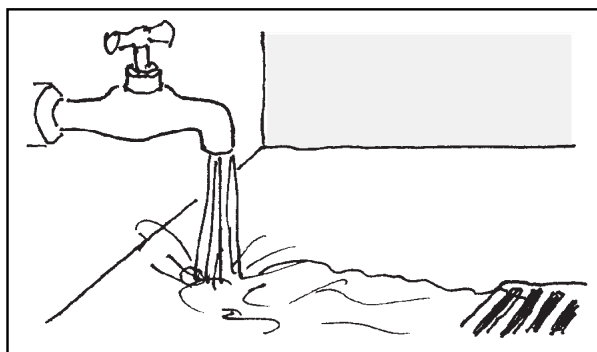


Fig. 2.1. L'acqua nella condotta è in pressione.

Tabella 2.1. Alcuni valori tipici di pressione

Conduttura dell'acqua	2 - 5 bar
Pneumatico d'automobile	4 bar
Vapore acqueo nella caldaia di una centrale elettrica	150 bar
Liquido idraulico di una scavatrice	150 bar
Nel punto più profondo dell'oceano	1 100 bar
Bombola di ossigeno piena	150 bar
Bombola di propano piena	8 bar
Per la produzione di diamante artificiale a partire da grafite, la grafite viene sottoposta a una pressione di almeno	15 000 bar
Al centro del Sole	221 000 000 000 bar

Il bar è più comodo e più usato del pascal. Per i fisici però l'unità più piccola, il pascal, ha un vantaggio: la relazione tra la pressione e altre grandezze fisiche diventa più semplice. Lo capirai meglio più tardi.

2.2 Pressione atmosferica, sovrappressione, vuoto

L'aria che ci circonda ha una pressione di quasi esattamente 1 bar. Questa pressione è detta *pressione normale*. La pressione atmosferica è provocata dagli strati d'aria più alti che premono, a causa del loro peso, sugli strati più bassi.

Per questo motivo la pressione atmosferica diminuisce dal basso verso l'alto, prima rapidamente e poi sempre più lentamente. In fig. 2.3 è mostrato l'andamento della pressione atmosferica in funzione dell'altezza sul livello del mare. A 4000 m di altitudine, cioè in alta montagna, la pressione atmosferica vale appena circa 0,6 bar.

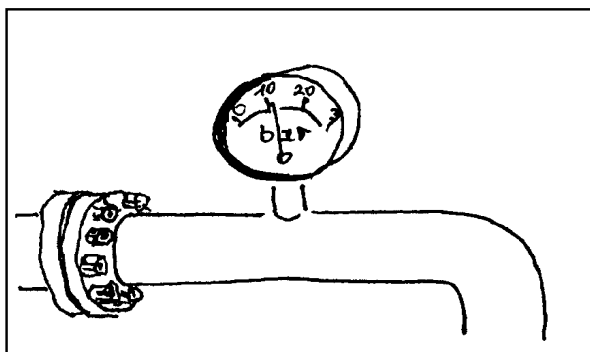


Fig. 2.2. Le pressioni si misurano con il manometro.

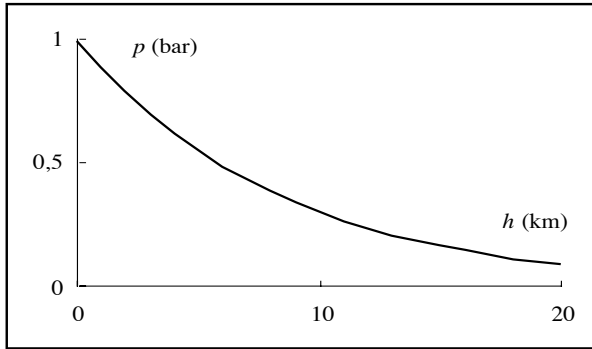


Fig. 2.3. Pressione atmosferica in funzione dell'altitudine sul livello del mare

La pressione atmosferica non è la stessa in ogni momento. Il suo valore dipende dalle condizioni atmosferiche. L'apparecchio che misura la pressione dell'aria che ci circonda ha un nome particolare: *barometro*.

Il motivo per cui non percepiamo la pressione atmosferica, è che l'aria preme sul nostro corpo da tutte le direzioni. Anche nelle cavità del nostro corpo, come i polmoni o le orecchie, c'è aria alla stessa pressione dell'aria esterna. La maggior parte dei manometri non misura la pressione reale, cioè il suo valore assoluto, ma la cosiddetta *sovrappressione*. Ad esempio: il manometro con cui si controlla la pressione dei pneumatici di un'auto, misura la differenza tra la pressione dell'aria dentro il pneumatico e quella all'esterno.

In un contenitore si può anche avere aria a una pressione minore di quella esterna. Diremo allora che nel contenitore c'è una *sottopressione*. Se nel contenitore non c'è né aria né nessun'altra sostanza, allora la pressione è di 0 bar. Questo spazio privo di materia viene detto *vuoto*.

Esercizi

1. Se a casa tua hai un barometro: leggi per 7 giorni consecutivi la pressione al mattino e alla sera. Rappresenta la pressione in funzione del tempo.
2. Un automobilista controlla la pressione della ruota di scorta. Il manometro segna 0 bar di sovrappressione. Qual è il valore effettivo della pressione nella ruota di scorta?

2.3 La differenza di pressione come spinta di una corrente di liquidi o di gas

Se apriamo la valvola di un pneumatico gonfio, l'aria fuoriesce. Fluisce dall'interno del pneumatico, dove c'è una pressione elevata, all'esterno, dove la pressione è minore. Se apriamo una confezione di arachidi "sotto vuoto", si sente un sibilo. L'aria entra nella confezione dove c'è una pressione più bassa rispetto all'esterno. In entrambi i casi l'aria fluisce da un punto dove la pressione è alta, verso un punto

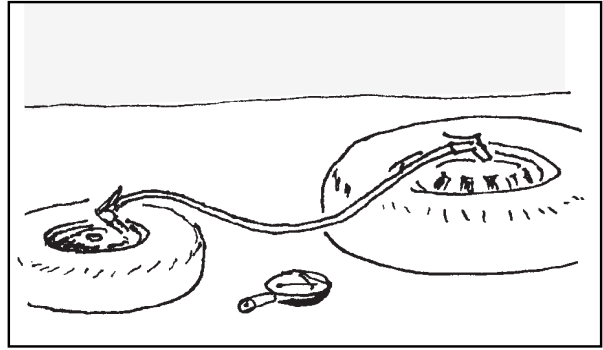


Fig. 2.4. L'aria fluisce dal pneumatico con la pressione maggiore al pneumatico con la pressione minore.

dove la pressione è più bassa. Colleghiamo a un rubinetto un tubo lungo e sottile e poi apriamolo. Ovviamente uscirà dell'acqua. L'acqua nella condotta è a pressione elevata. Alla fine del tubo è a una pressione più bassa, a pressione normale. Dunque anche l'acqua fluisce da un punto a pressione elevata verso uno a pressione bassa. Lo stesso vale per altri liquidi o gas.

Liquidi e gas fluiscono spontaneamente da punti a pressione più alta verso punti a pressione più bassa. La differenza di pressione è la spinta delle correnti di liquidi o gas.

Un pneumatico d'auto viene gonfiato e poi collegato con un tubo a un altro pneumatico, sgonfio, fig. 2.4. Si sente l'aria fluire nel tubo, ma dopo un po' di tempo il flusso si ferma. Togliamo il tubo e misuriamo la pressione dei due pneumatici. Risultato: la pressione nei due pneumatici è la stessa. Nel pneumatico inizialmente gonfio, dove la pressione era più alta, la pressione è diminuita, nell'altro è aumentata. Cosa è successo? L'aria è fluita dal pneumatico con la pressione maggiore verso quello con la pressione minore finché la differenza di pressione, cioè la spinta della corrente, è svanita. Lo stato finale dove l'aria non fluisce più (anche se c'è ancora il collegamento) è detto *equilibrio di pressione*.

Tieni presente che nello stato finale la quantità d'aria nei pneumatici è diversa: nel pneumatico più grande c'è più aria.

Si vede chiaramente che la spinta della corrente d'aria non è la pressione ma la *differenza* di pressione: quando c'è equilibrio di pressione l'aria non fluisce più anche se la pressione stessa è ancora alta.

Esercizio

La pressione dell'aria in un pneumatico grande è di 1 bar e in uno piccolo di 4 bar. I due pneumatici vengono collegati con un tubo, in modo che l'aria possa fluire dall'uno all'altro.

- (a) Cosa succede?
- (b) La pressione di equilibrio è più vicina a 1 bar o a 4 bar?
- (c) In quale pneumatico c'è più aria alla fine?

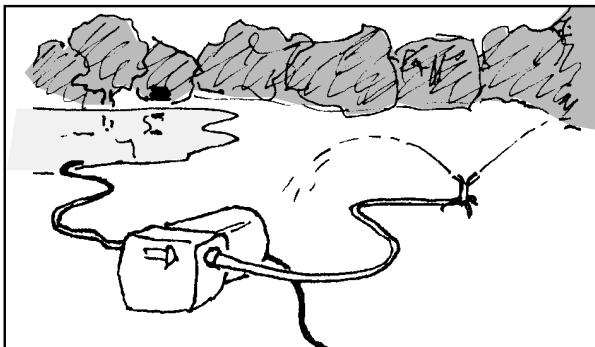


Fig. 2.5. All'uscita della pompa, l'acqua ha una pressione maggiore che all'entrata.

2.4 Le pompe

Spesso vorremmo trasportare un liquido o un gas, da un punto dove la pressione è bassa verso uno dove è più alta. Si riesce a farlo grazie a una pompa. La pressione dell'acqua all'uscita dalla pompa in fig. 2.5, è maggiore di quella in entrata.

Esistono diversi tipi di pompa. La fig. 2.6 mostra un *pompa centrifuga*. L'acqua che entra, giunge al centro tra le pale dell'elica. Visto che l'elica gira, anche l'acqua è costretta a girare e viene così accelerata verso l'esterno (come i passeggeri di un'auto in curva) e spinta fuori. Le pompe centrifughe vengono utilizzate per esempio per togliere l'acqua da una lavatrice. Il funzionamento di una pompa a ingranaggi è illustrato in fig. 2.7. Con le pompe a ingranaggi si possono generare differenze di pressione molto grandi. Una versione un po' più raffinata di questo tipo di pompa viene usata nelle scavatrici come pompa idraulica. Le pompe che permettono di aumentare la pressione di un gas, sono dette anche compressori.

Le pompe trasportano gas e liquidi da punti a pressione bassa verso punti a pressione alta.

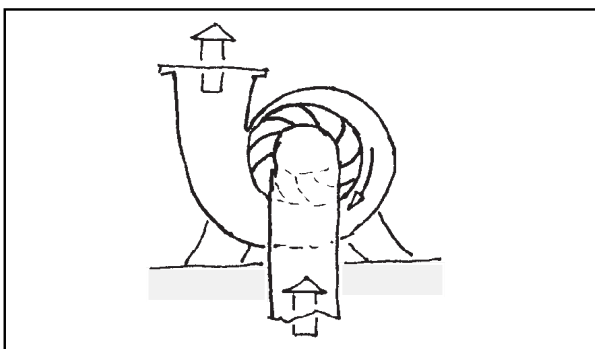


Fig. 2.6. Pompa centrifuga

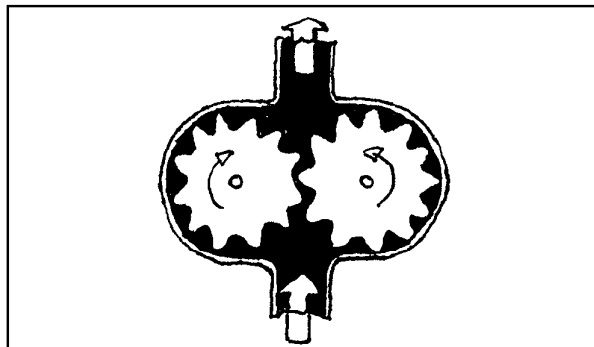


Fig. 2.7. Pompa a ingranaggi

2.5 L'intensità della corrente

Può succedere che si vogliano confrontare due correnti, per esempio due correnti d'acqua. Si potrebbe chiedere: "quale delle due correnti è più larga?", oppure "quale delle due correnti è più rapida?" Spesso però non interessano né la larghezza né la velocità di una corrente, ma l'*intensità della corrente*. L'intensità di una corrente d'acqua equivale alla quantità d'acqua che scorre da un determinato punto in un certo intervallo di tempo, divisa per quell'intervallo di tempo:

$$\text{Intensità della corrente} = \frac{\text{quantità d'acqua}}{\text{intervallo di tempo}}$$

La quantità d'acqua può essere misurata in litri o in chilogrammi. Come unità di misura dell'intensità di corrente, si ottiene quindi l/s o kg/s. A Karlsruhe, sotto il ponte sul Reno scorrono circa 1 500 000 litri al secondo. L'intensità della corrente del Reno è quindi di 1 500 000 l/s.

Nel capitolo precedente abbiamo già incontrato l'intensità della corrente di energia. Indica quanti Joule fluiscono in un secondo da un determinato punto.

L'intensità di una corrente e la sua velocità, si possono facilmente confondere. L'intensità della corrente del fiume in fig. 2.8 è la stessa dappertutto. La velocità invece è maggiore nei punti più stretti e minore nei punti più larghi.

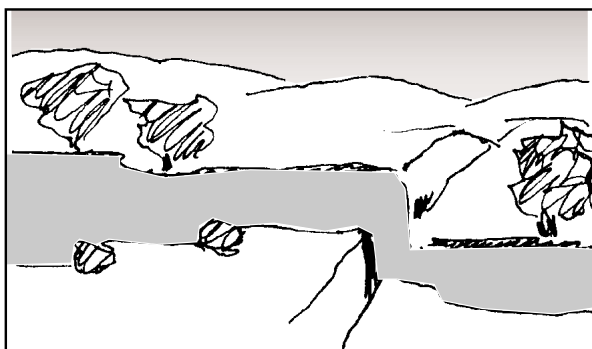


Fig. 2.8. L'intensità della corrente è la stessa in tutti i punti del fiume.

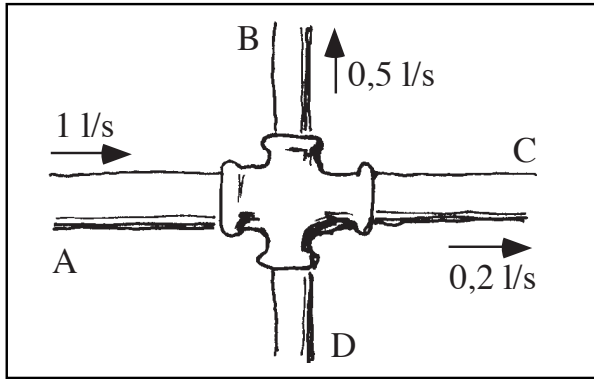


Fig. 2.9. Ogni secondo, dalla condotta A, affluisce al raccordo tanta acqua quanta ne esce attraverso le condotte B, C e D

In fig. 2.9, nella condotta A scorre, da sinistra verso il raccordo, una corrente d'acqua di 1 l/s. Dalle condotte B e C escono rispettivamente una corrente di 0,5 l/s e una corrente di 0,2 l/s. Che intensità e che direzione ha la corrente che attraversa la condotta D? Visto che nel raccordo non viene prodotta acqua ma nemmeno ne scompare, la quantità d'acqua che entra nel raccordo ogni secondo deve essere uguale alla quantità che esce. Affinché nel nostro esempio il bilancio sia giusto, dalla condotta D devono uscire 0,3 l/s:

$$\begin{array}{l} \text{nel raccordo entra} \\ \quad \quad \quad 1 \text{ l/s} \\ \text{dal raccordo esce} \\ \quad 0,5 \text{ l/s} + 0,2 \text{ l/s} + 0,3 \text{ l/s} = 1 \text{ l/s.} \end{array}$$

Un punto dove si incrociano più correnti è detto *nodo*. Per calcolare l'intensità della corrente d'acqua attraverso la condotta D, abbiamo applicato la *regola dei nodi*:

Le intensità delle correnti che fluiscono in un nodo, sono complessivamente uguali alle intensità delle correnti che escono dal nodo.

Esercizi

- Una vasca da bagno da 120 l si riempie in 20 minuti. Qual è l'intensità della corrente d'acqua che fluisce nella vasca?
- In un tubo c'è una corrente d'intensità 2 l/s, in un altro di 3 l/s. Da questi dati, si può stabilire in quale tubo l'acqua scorre più in fretta? Motiva la tua risposta.
- Tre fiumi dalle intensità $5 \text{ m}^3/\text{s}$, $2 \text{ m}^3/\text{s}$ e $3 \text{ m}^3/\text{s}$, confluiscono in un punto. Qual è l'intensità della corrente del fiume dopo la confluenza?

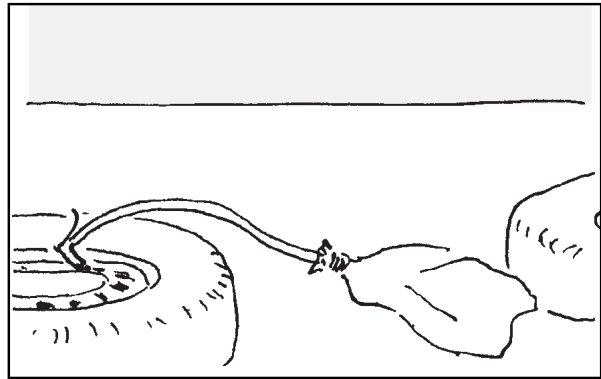


Fig. 2.10. Più la pressione nel pneumatico è alta, più in fretta si riempie il sacchetto di plastica

2.6 Intensità di corrente e spinta

Hai aperto al massimo il rubinetto ma non esce tanta acqua come di solito. Da cosa potrebbe dipendere? Naturalmente dalla pressione nella condotta dell'acqua. La differenza di pressione tra l'acqua nella condotta e l'esterno, cioè la pressione normale di 1 bar, è la spinta della corrente che esce dal rubinetto. Più la pressione nella condotta è alta, maggiore sarà la differenza di pressione e di conseguenza l'intensità della corrente.

Riempiamo un sacchetto di plastica con l'aria che esce da un pneumatico gonfio, fig. 2.10. Facciamo l'esperimento una volta con un pneumatico con una sovrappressione di 2 bar e una volta con uno a 0,5 bar. Constatiamo che nel primo caso il sacchetto di plastica si riempie più in fretta. Anche in questo caso, da una maggiore differenza di pressione consegue una maggiore intensità della corrente.

Più la differenza di pressione tra due punti è grande (più la spinta è grande), maggiore sarà l'intensità della corrente che fluisce da un punto all'altro.

Esercizio

Nel tubo in fig. 2.11 scorre acqua.

- L'intensità della corrente all'estremità sinistra del tubo è di 10 l/s. Qual è l'intensità della corrente all'estremità destra del tubo? Motiva la tua risposta.
- La differenza di pressione tra l'estremità sinistra e la strozzatura è di 2 bar. La differenza di pressione tra la strozzatura e l'estremità destra del tubo è maggiore o minore di 2 bar? Motiva la tua risposta.

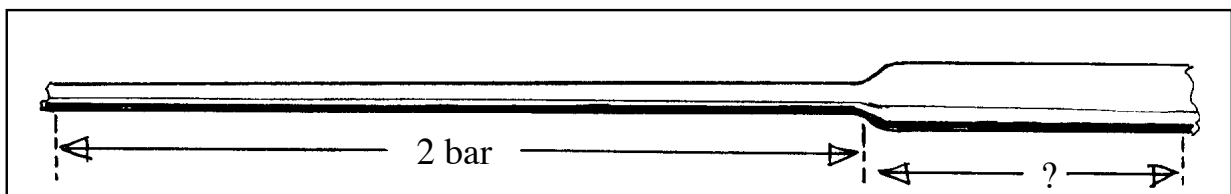


Fig. 2.11. La differenza di pressione tra la strozzatura e l'estremità destra del tubo, è maggiore o minore di 2 bar?

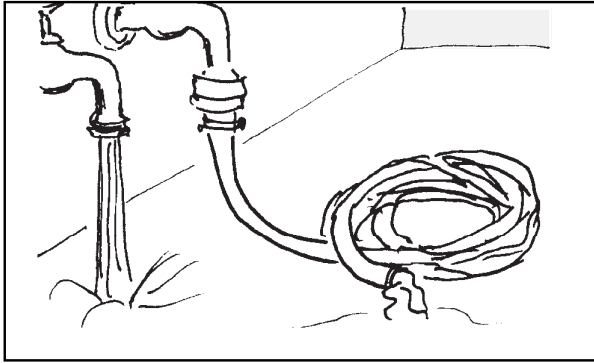


Fig. 2.12. Il tubo da giardino oppone una resistenza alla corrente d'acqua.

2.7 Intensità di corrente e resistenza

A un rubinetto, dal quale solitamente esce un getto intenso, si allaccia un tubo da giardino lungo 50 m. Se apriamo al massimo il rubinetto, il getto d'acqua che esce dal tubo è nettamente meno forte. L'intensità della corrente d'acqua con il tubo, è minore che senza il tubo, fig. 2.12. Da cosa dipende? Non può dipendere dalla spinta, che è la stessa in entrambi i casi. È il tubo il responsabile della diminuzione dell'intensità di corrente: ostacola la corrente d'acqua, le oppone una *resistenza*.

Rifacciamo l'esperimento con il pneumatico e il sacchetto di plastica. Riempiamo il sacchetto due volte di fila con l'aria proveniente dallo stesso pneumatico. La prima volta li colleghiamo con un tubo il più corto possibile, la seconda con un tubo molto lungo ma della stessa grossezza del primo. La prima volta il sacchetto si riempie più in fretta che la seconda, l'intensità della corrente d'aria è maggiore nel primo caso. Il tubo lungo oppone una resistenza maggiore di quello corto. Si dice anche che il tubo lungo "ha" una resistenza maggiore.

Confrontiamo ora la resistenza di due tubi che hanno la stessa lunghezza, ma diametri diversi e constatiamo che quanto più è grande la sezione della condotta, tanto minore la sua resistenza.

Ogni condotta oppone resistenza a una corrente di gas rispettivamente di liquidi che la attraversa. La resistenza è maggiore tanto più lunga è la condotta e tanto più piccola la sua sezione.

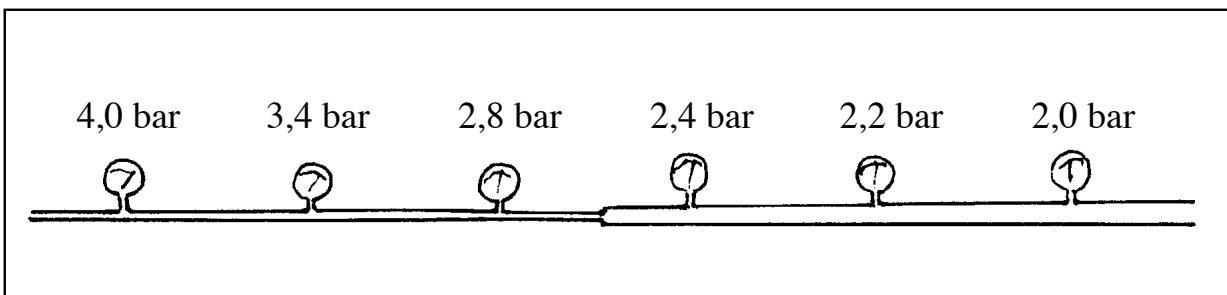


Fig. 2.14. Nella parte stretta del tubo la caduta di pressione è maggiore che nella parte larga.

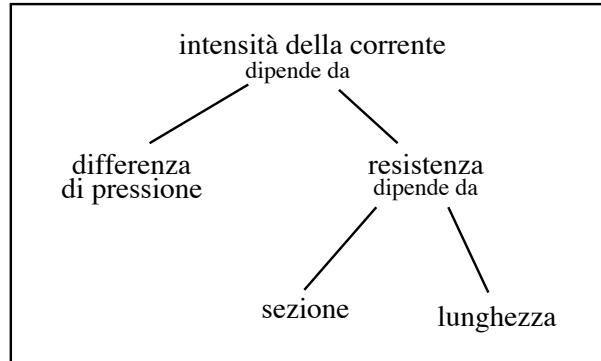


Fig. 2.13. Relazione tra intensità di corrente, differenza di pressione e caratteristiche della condotta

L'intensità di una corrente non dipende quindi unicamente dalla spinta, ma anche dalle caratteristiche della condotta che attraversa.

L'intensità di una corrente di gas o di liquidi è maggiore quando:

- la differenza di pressione tra le estremità della condotta è maggiore;
- la resistenza della condotta è minore.

Le relazioni tra intensità di corrente, differenza di pressione e resistenza così come tra resistenza, lunghezza e sezione, sono riassunte in fig. 2.13.

La fig. 2.14 mostra una lunga condotta per l'acqua sulla quale, a intervalli regolari, sono montati dei manometri. Vogliamo cercare di capire i valori segnati dai manometri. Dal fatto che il manometro più a sinistra segna un valore maggiore di quello più a destra, possiamo concludere che l'acqua scorre da sinistra verso destra: dalla pressione maggiore a quella minore. Ma già tra il primo e il secondo manometro la pressione deve diminuire perché, per superare questa distanza, l'acqua ha bisogno di spinta, così come tra il secondo e il terzo ecc. Inoltre constatiamo che nella parte sottile le differenze di pressione tra due manometri vicini sono tutte uguali a 0,6 bar. Anche nella parte grossa del tubo le differenze di pressione tra due manometri vicini sono uguali tra loro: 0,2 bar. Però la differenza di pressione tra due manometri vicini nella parte sottile non è uguale a quella nella parte grossa.

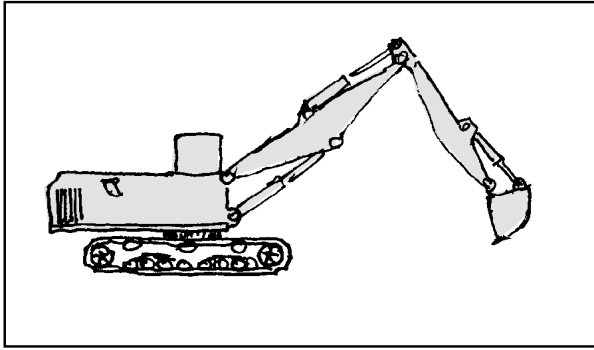


Fig. 2.15. La scavatrice può spostarsi, ruotare la parte superiore, piegare e oscillare il braccio e inclinare il cucchiaio.

Anche questo è facile da capire: per far passare la stessa quantità d'acqua attraverso il tubo sottile ci vuole una differenza di pressione maggiore che per farla passare attraverso il tubo più grosso.

2.8 Trasmissione idraulica di energia

La scavatrice è una macchina poliedrica. Può spostarsi, ruotare la parte superiore, può piegare e oscillare il braccio e può inclinare il cucchiaio posto alla fine del braccio, fig. 2.15. Tutte queste funzioni sono rese possibili da una serie di circuiti idraulici.

Un motore diesel aziona una pompa. La pompa spinge dell'olio idraulico nei tubi fino ai punti dove si deve muovere qualcosa. Attraverso una seconda condotta l'olio torna alla pompa. Dove si deve girare qualcosa (le ruote della scavatrice, la parte superiore) c'è un motore idraulico, dove qualcosa deve essere mosso in avanti e indietro, un cilindro idraulico, fig. 2.16.

La fig. 2.17 mostra la sezione di un circuito idraulico di una scavatrice: la pompa e uno dei motori idraulici. Si può notare che l'olio idraulico fluisce in un circuito chiuso. Nella condotta che va al motore, a pressione elevata, nella condotta che torna alla pompa, a pressione minore.

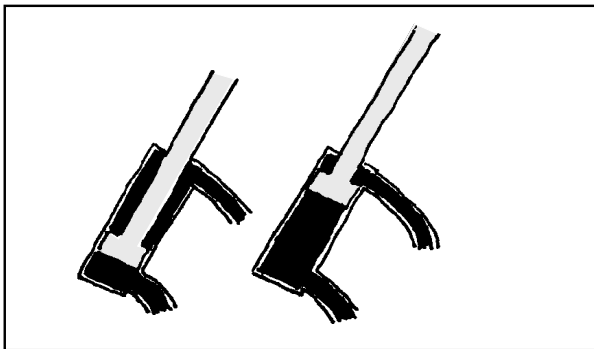


Fig. 2.16. Cilindro idraulico

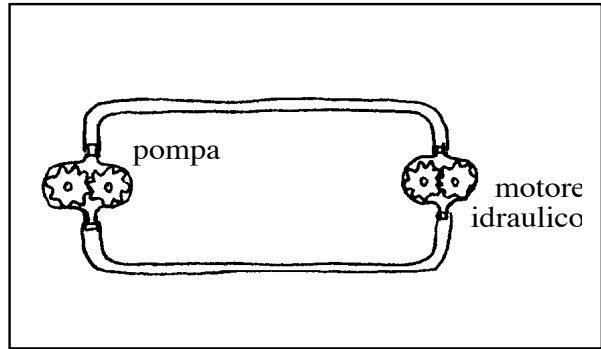


Fig. 2.17. Circuito idraulico

Vogliamo ancora descrivere i processi dal punto di vista energetico. L'energia arriva alla pompa dal motore diesel con il portatore quantità di moto angolare. Nella pompa cambia portatore: viene trasferita all'olio idraulico. Assieme all'olio giunge al motore idraulico attraverso la condotta ad alta pressione e lì viene nuovamente trasferita alla quantità di moto angolare. L'olio, dopo aver scaricato la sua energia, torna alla pompa. La fig. 2.18 mostra il corrispondente diagramma di flusso.

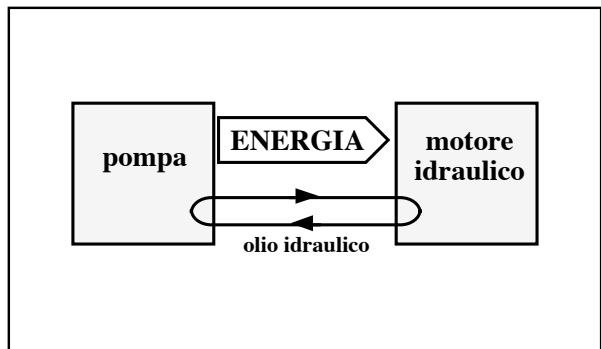


Fig. 2.18. Diagramma di flusso dell'energia per un comando pneumatico

Quantità di moto

3. Quantità di moto e correnti di quantità di moto

Affrontiamo ora un'area vastissima della fisica: la meccanica. Per cominciare diamo una definizione provvisoria: la meccanica si occupa del moto degli oggetti. Andando avanti, ci renderemo conto sempre più che questa definizione è troppo riduttiva; per il momento è comunque sufficiente.

La meccanica è la parte più vecchia della fisica. Le leggi più importanti della meccanica sono conosciute da più di 200 anni. Per lungo tempo l'obiettivo dichiarato della fisica fu di riuscire a spiegare tutti gli aspetti della natura in modo meccanico, riconducendoli alla meccanica. Non solamente quei processi palesemente connessi al moto, ma anche processi termici, ottici, elettrici e chimici. Ne sarebbe conseguito che tutto il mondo non sarebbe altro che un enorme, complicatissimo "meccanismo".

Dall'inizio del XX° secolo sappiamo che questo punto di vista non è più sostenibile. Altre parti della fisica sono equiparate alla meccanica, per esempio l'elettrologia e la termologia. Inoltre, di solito in un processo oltre alla meccanica hanno un ruolo anche elettricità, calore e altri fenomeni fisici. Quindi, occupandoci della meccanica consideriamo sempre solo un aspetto dei processi: l'aspetto meccanico. Quando esaminiamo un oggetto ci interesserà sapere se e come si muove. Non ci interesserà la sua temperatura, sapere se è elettricamente carico o di quale colore sia; e ovviamente non ci occuperemo per niente di problemi che nulla hanno a che vedere con la fisica, come il suo prezzo o il fatto che sia bello o brutto.

Prima di cominciare con la meccanica, nel prossimo paragrafo, dobbiamo ancora imparare qualcosa sullo strumento più importante del fisico: la grandezza fisica.

3.1 Grandezze fisiche

È tipico della fisica descrivere la natura in modo quantitativo. Con "quantitativo" vogliamo dire che si esprime in numeri. Così un fisico non è soddisfatto se sa che un oggetto ha una temperatura elevata, una piccola massa o una bassa velocità. Tenta soprattutto di procurarsi i *valori* di temperatura, massa e velocità. Il suo scopo quindi potrebbe essere di calcolare o misurare che una temperatura è di 1530 °C, una massa di 5,3 milligrammi o una velocità di 882 metri al secondo.

Temperatura, massa e velocità sono dette *grandezze fisiche*. Ci sono molte altre grandezze fisiche. Molte di loro ti saranno già note, altre le conoscerai durante questo corso di fisica.

Le grandezze fisiche sono tra gli strumenti più importanti a disposizione del fisico.

Vogliamo qui richiamare alla memoria alcune regole fondamentali nella pratica con le grandezze fisiche; regole che conosci da tempo, magari senza esserne consapevole e magari senza averle sempre rispettate.

Ogni grandezza fisica viene abbreviata con una lettera. Queste abbreviazioni sono internazionali. In tabella 3.1 trovi alcuni esempi.

Nota che c'è differenza tra simboli in maiuscolo e in minuscolo. Spesso una lettera minuscola rappresenta una grandezza fisica diversa dalla rispettiva lettera maiuscola. Ad esempio v è la velocità mentre V è il volume. A volte per una grandezza sono ammessi più simboli. L'energia non si abbrevia solo con E , ma spesso anche con L .

Come già saprai, ogni grandezza fisica ha un'unità di misura. Il tempo si misura in secondi, l'energia in joule e la pressione in bar. La tabella 3.2 mostra alcuni esempi di unità di misura.

Tabella 3.1. Nomi e abbreviazioni di alcune grandezze fisiche

Nome della grandezza	Simbolo
massa	m
velocità	v
tempo	t
volume	V
energia	E o L
pressione	P

Tabella 3.2. Nomi e unità di misura di alcune grandezze fisiche

Nome della grandezza	Unità di misura
massa	chilogrammo
velocità	metri al secondo
tempo	secondo
volume	metro cubo
energia	joule
pressione	bar

Tabella 3.3. Nomi e unità di misura di alcune grandezze fisiche e abbreviazioni per entrambi

Nome della grandezza (simbolo)	Unità di misura (simbolo)
massa (m)	chilogrammo (kg)
velocità (v)	metri al secondo (m/s)
tempo (t)	secondo (s)
volume (V)	metro cubo (m ³)
energia (E)	joule (J)
pressione (p)	bar (bar)

L'unità rappresenta un quantitativo ben preciso della grandezza. Il valore di una grandezza è quindi sempre dato come multiplo o frazione della sua unità. Quando diciamo "l'energia contenuta nell'oggetto è di 1000 J" intendiamo che l'oggetto contiene 1000 volte l'unità di energia definita come "1 joule".

Esattamente come il nome di una grandezza, anche il nome della sua unità di misura viene abbreviato. Così "metro" è abbreviato con "m", "joule" con "J" e "secondo" con "s". Perché non nascano confusioni tra i simboli delle grandezze fisiche e quelli delle unità di misura, i simboli delle grandezze sono in corsivo. Quindi m è la grandezza fisica massa mentre m è l'unità di misura metro. Anche le unità di misura sono fissate a livello internazionale. In tabella 3.3 è riassunto quanto detto finora per alcune grandezze. La tabella contiene 1. i nomi di alcune grandezze 2. le abbreviazioni di questi nomi 3. le unità di misura corrispondenti 4. le abbreviazioni delle unità di misura.

Grazie alle abbreviazioni dei nomi e delle unità di misura, determinate affermazioni possono essere scritte in modo molto compatto. Invece di "la velocità è di cento metri al secondo" scriviamo semplicemente

$$v = 100 \text{ m/s.}$$

Oppure, invece di "l'energia è quarantamila joule" scriviamo

$$E = 40\,000 \text{ J.}$$

Importante: 1. Non confondere i nomi delle grandezze e delle unità di misura! 2. Non confondere i simboli delle grandezze e delle unità di misura!

Tabella 3.4. Prefissi con i quali si indicano multipli e frazioni delle unità di misura

Prefisso	Abbreviazione	Significato
chilo	k	migliaia
mega	M	milioni
giga	G	miliardi
tera	T	bilioni
milli	m	millesimi
micro	μ	milionesimi
nano	n	miliardesimi
pico	p	bilionesimi

Spesso si ha a che fare con valori molto grandi o molto piccoli di una grandezza fisica. In questo caso, come unità si possono usare dei multipli o delle frazioni dell'unità normale. Questi multipli e queste frazioni sono caratterizzate dal prefisso anteposto al nome dell'unità. Il significato dei prefissi è elencato in tabella 3.4. Ogni prefisso ha a sua volta un'abbreviazione. Anche le abbreviazioni sono in tabella 3.4. Ad esempio:

$$40\,000 \text{ Joule} = 40 \text{ kJ} = 0,04 \text{ MJ,}$$

oppure

$$0,000\,002 \text{ m} = 0,002 \text{ mm} = 2 \mu\text{m.}$$

Esercizi

- Cita quattro grandezze (diverse da quelle in tabella 3.1), le loro unità di misura così come i simboli per le grandezze e le unità di misura.
- Serviti dei prefissi elencati in tabella 3.4 per abbreviare:

$$E = 12\,000\,000 \text{ J}$$

$$v = 1\,500 \text{ m/s}$$

$$p = 110\,000 \text{ Pa.}$$
- Esprimi la velocità $v = 72 \text{ km/h}$ nell'unità di misura m/s.
- Cita delle unità di misura qualsiasi che oggi non sono più usate.

3.2 Quantità di moto e velocità

Secondo la nostra attuale definizione, la meccanica si occupa del moto di oggetti o, come si usa dire, di *corpi*.

Per poter cominciare una descrizione fisica del moto, dobbiamo munirci degli strumenti adatti. Ricorda che i nostri strumenti più importanti sono le grandezze fisiche. Poco alla volta conosceremo molte grandezze. Per ora possiamo accontentarci di due sole grandezze, due grandezze con le quali possiamo caratterizzare lo stato di moto di un corpo. Una ti è familiare da tempo: la velocità, abbreviata v . Per la velocità c'è tutta una serie di unità di misura: chilometri all'ora (chilometri orari), nodi, millimetri al giorno, ecc. L'unità usata in fisica, come già visto nel paragrafo precedente, è il metro al secondo, abbreviato m/s.

La seconda grandezza di cui abbiamo bisogno, ti è sicuramente sconosciuta come grandezza fisica, cioè come qualcosa a cui si possa assegnare un valore numerico. A parte questa proprietà però la conosci già bene. E ti familiarizzerai così in fretta con lei da essere in grado di precisarne i valori. Si tratta ancora di una grandezza con la quale descrivere il moto, con la quale per esempio distinguere un veicolo fermo da uno in movimento. Rispetto alla velocità ha però una particolarità: rappresenta qualcosa che è *contenuto* nel corpo quando si muove e

che non è vi contenuto quando è fermo. Ognuno conosce dei concetti che descrivono esattamente questa proprietà. Ognuno di noi dice ad esempio che un pesante vagone in movimento ha "slancio" o "impeto". Lo stesso vagone, quando è fermo, non ha né slancio né impeto. Le proprietà di ciò che viene comunemente chiamato slancio o impeto, coincidono molto bene con le proprietà della grandezza fisica che stiamo cercando. In effetti potremmo chiamarla così, la grandezza fisica, per esempio "slancio". Un termine settoriale si è però affermato. Questa grandezza è detta "quantità di moto". Il suo simbolo è p . (Attenzione: è lo stesso simbolo usato per la pressione.)

Un corpo in movimento contiene quantità di moto. Se si muove rapidamente ed è massiccio, contiene molta quantità di moto. Se non si muove, non contiene quantità di moto.

Come determinare quantitativamente la quantità di moto (slancio) contenuta in un corpo, verrà discusso più avanti. Vogliamo però conoscere subito l'unità di misura della quantità di moto. Il suo nome è *huygens*, abbreviato Hy, in onore del fisico Christian Huygens (1629-1695) che ha contribuito massicciamente alla scoperta della grandezza quantità di moto.

Studieremo ora a fondo le proprietà principali della grandezza p . Basta tener presente che sostanzialmente la quantità di moto è ciò che comunemente viene detto slancio.

Due auto identiche percorrono una strada, una velocemente, l'altra più adagio, fig. 3.1. In quale dei due veicoli c'è più quantità di moto? (Quale auto ha più slancio?) In quella che si muove più in fretta, che ha la velocità più alta.

Più la velocità di un corpo è elevata, più quantità di moto contiene.

Un autocarro e un'utilitaria si muovono affiancati alla stessa velocità, per esempio 60 km/h. Il peso dell'autocarro sia 8000 kg, quello dell'utilitaria 1200 kg, fig. 3.2. Quale dei due veicoli ha più quantità di moto questa volta? Naturalmente l'autocarro. La grandezza che si misura in kg e che viene comu-

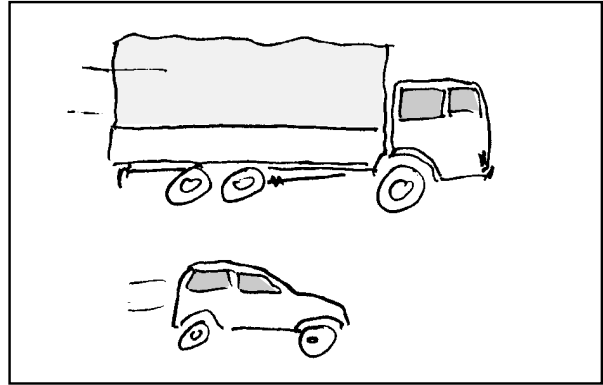


Fig. 3.2. I due veicoli viaggiano alla stessa velocità. Quello pesante ha più quantità di moto di quello leggero.

nemente chiamata "peso", nella scienza si chiama *massa*. Così possiamo dire:

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

Siamo già in grado di dare la definizione dell'unità di misura della quantità di moto, *l'huygens*:

Un corpo con la massa di 1 kg e la velocità di 1 m/s contiene 1 Hy.

Faremo molti esperimenti nei quali l'attrito darebbe fastidio. Utilizziamo quindi dei veicoli con poco attrito. Un modo efficace per ridurre notevolmente l'attrito, consiste nel sostituire le ruote con un cuscinetto d'aria. La fig. 3.3 mostra una rotaia a cuscinetto d'aria come quelle che usiamo volentieri per questi esperimenti. La rotaia ha delle file di fori dai quali esce l'aria. Le slitte non toccano la rotaia, galleggiano su un cuscinetto d'aria.

Si consideri un veicolo praticamente privo di attrito che si muove su una rotaia orizzontale. Potrebbe trattarsi di un vagone ferroviario (senza locomotiva) su un binario orizzontale, ma anche di una slitta su un cuscinetto d'aria. Osserviamo il veicolo in tre momenti diversi, fig. 3.4. All'inizio, fig. 3.4a, il vagone si muove con una certa velocità; di conseguenza nel vagone c'è una certa quantità di moto. In un secondo momento, fig. 3.4b, la velocità è ancora la stessa e alla terza osservazione, fig. 3.4c, pure. La quantità di moto che il vagone aveva all'inizio ce

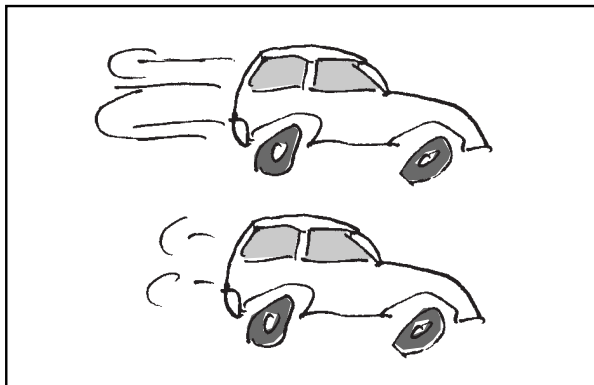


Fig. 3.1. Le due auto sono fatte allo stesso modo. Quella più veloce ha più quantità di moto.

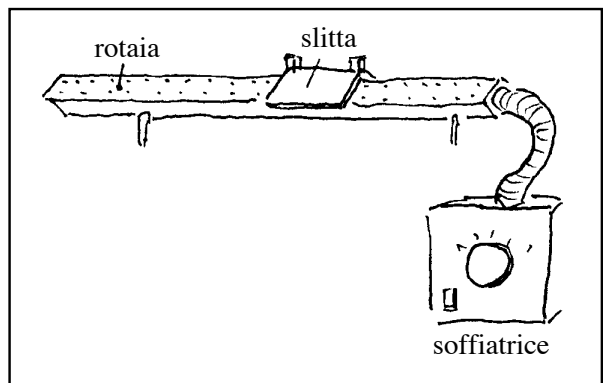


Fig. 3.3. Rotaia a cuscinetto d'aria. La slitta si muove quasi senza attrito.

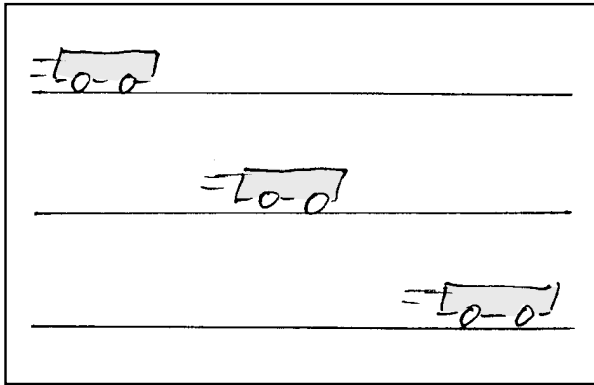


Fig. 3.4. Il vagone si muove quasi senza attrito. Non perde quasi quantità di moto.

l'ha ancora più tardi: la quantità di moto è semplicemente rimasta nel vagone - come una qualsiasi altra carica che stesse portando e di cui nulla fosse andato perso.

Se invece il veicolo fosse mal lubrificato, la sua carica di quantità di moto diminuirebbe nel tempo. Cosa succede in questo caso alla quantità di moto, dove va a finire, verrà esaminato più avanti. Per ora esploreremo solamente con veicoli che si muovono senza o con un trascurabile *attrito*.

La fig. 3.5a mostra due slitte identiche; quella a sinistra, slitta A, si muove verso destra, quella a destra, slitta B, è ferma. Poco tempo dopo, fig. 3.5b, A urta B e osserviamo che dopo l'urto A è ferma e B si muove verso destra. Vogliamo chiarire questo processo, spiegando cos'è successo alla quantità di moto. All'inizio, cioè prima dell'urto, A aveva una certa quantità di moto, diciamo 12 Hy , B non ne aveva. Durante l'urto tutta la quantità di moto di A passa su B. Tutti i 12 Hy sono stati scaricati da A su B così che dopo l'urto, la slitta A non ha più quantità di moto.

La quantità di moto può passare da un corpo a un altro.

Nell'esperimento in fig. 3.5, tra le due slitte c'è un respingente a molla. Ripetiamo ora l'esperimento, ma questa volta con un respingente totalmente anelastico: sostituiamo la molla con un po' di plastilina, fig.

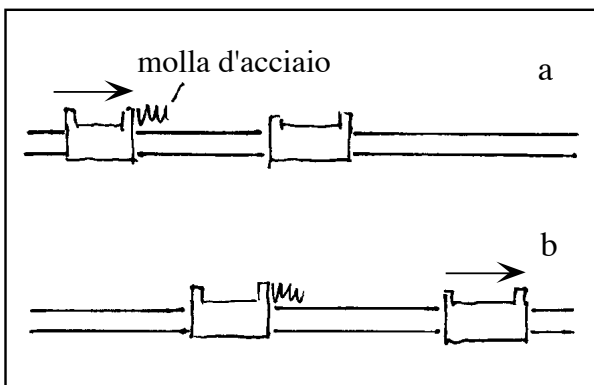


Fig. 3.5. Prima dell'urto (a) la slitta a sinistra si muove e quella a destra è ferma. Dopo (b) si muove quella a destra ed è ferma quella a sinistra.

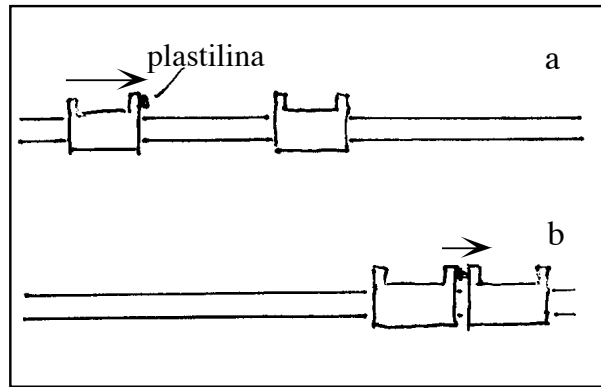


Fig. 3.6. Prima dell'urto (a) la slitta a sinistra si muove e quella a destra è ferma. Dopo (b) si muovono entrambe, ma a velocità ridotta.

3.6. Questa volta l'esperimento procede diversamente. Come prima, all'inizio la slitta A si muove e la slitta B è ferma. Dopo l'urto però, le due slitte si muovono verso destra alla stessa velocità. Velocità comunque minore di quella della slitta A prima dell'urto. Come si spiega? Questa volta non tutta la quantità di moto è passata da una slitta all'altra. I 12 Hy si sono piuttosto suddivisi metà-metà su A e B, così che alla fine ogni slitta ha 6 Hy .

La quantità di moto si può distribuire su più corpi.

Quello che è successo alla quantità di moto in fig. 3.6, è paragonabile a ciò che succede all'acqua in fig. 3.7. In fig. 3.7a tutta l'acqua è nel recipiente a sinistra. Dopo aver aperto il rubinetto, esattamente metà dell'acqua fluisce nel recipiente a destra. L'acqua si distribuisce quindi tra i due recipienti, così come durante l'urto in fig. 3.6, la quantità di moto si distribuisce sulle due slitte.

Facciamo ora urtare la slitta A (con il respingente anelastico) non contro una, ma contro due slitte B e C agganciate tra loro, fig. 3.8. Adesso la quantità di moto che A aveva all'inizio, si distribuisce equamente su tutti e tre le slitte A, B e C. Ogni slitta ha ora solo $1/3$ della quantità di moto iniziale di A. Se la quantità di moto iniziale di A era 12 Hy , dopo l'urto ogni slitta ha 4 Hy .

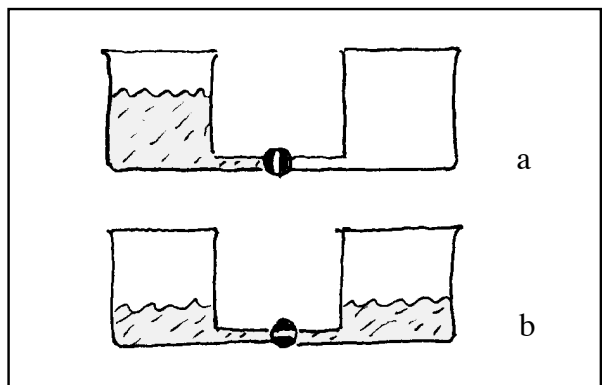


Fig. 3.7. L'acqua si distribuisce nei due recipienti così come la quantità di moto in fig. 3.6 si distribuisce sulle due slitte.

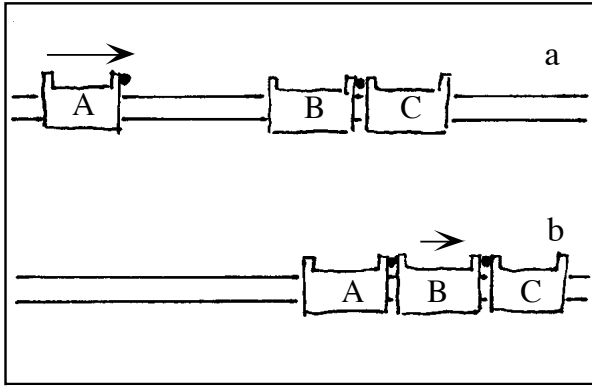


Fig. 3.8. Nell'urto la quantità di moto di A si distribuisce su tutti e tre le slitte A, B e C.

Se facciamo urtare A contro 3, 4 o 5 slitte ferme, la sua quantità di moto si distribuirà su 4, 5 o 6 slitte. Più lungo è il "treno" contro il quale urta A, meno quantità di moto riceverà ogni singola slitta e più lentamente si muoverà il treno dopo l'urto.

Infine, invece che contro un treno di slitte, facciamo urtare A contro il respingente all'estremità della rotaia a cuscino d'aria, fig. 3.9. Naturalmente la slitta A si ferma immediatamente. Dove è finita questa volta la quantità di moto? Chi fa da controparte ad A nell'urto? La controparte è la rotaia. La quantità di moto si distribuisce quindi su A e sulla rotaia. La rotaia però è fissata a un tavolo. La quantità di moto si distribuisce quindi su slitta, rotaia e tavolo. Inoltre il tavolo è appoggiato per terra. La quantità di moto si distribuisce quindi anche a terra. In altre parole: la quantità di moto si scarica a terra. In questo modo viene per così dire "diluata" così tanto che non la si nota più.

Un'altra versione dell'ultimo esperimento è la seguente: lanciamo una slitta e, prima che raggiunga l'estremità della rotaia, spegniamo la soffiatrice. Il cuscino d'aria scompare, la slitta si adagia sulla rotaia e si ferma. Finché c'era il cuscino d'aria, il moto della slitta era senza attrito. Togliendo il cuscino d'aria facciamo intervenire l'attrito. Possiamo quindi concludere:

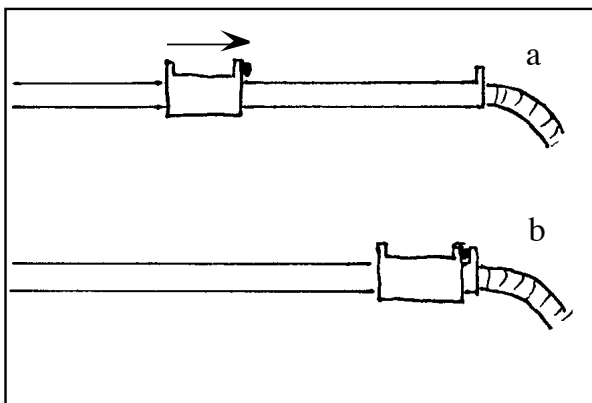


Fig. 3.9. Nell'urto, la quantità di moto della slitta defluisce a terra.

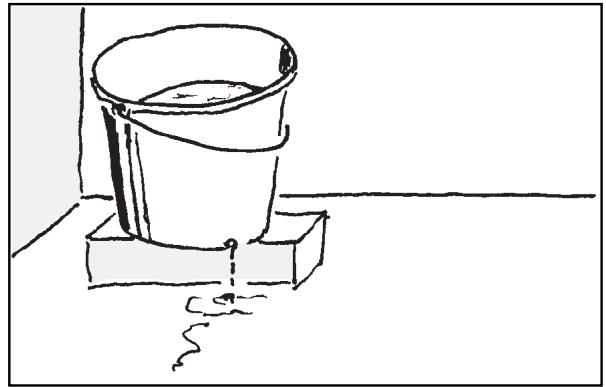


Fig. 3.10. Secchio bucato. L'acqua si disperde nell'ambiente circostante, fino a che non la si nota più.

Se un veicolo si muove con attrito in modo da fermarsi spontaneamente, la sua quantità di moto defluisce a terra.

Anche in questo caso è utile un paragone tra quantità di moto e acqua. Un veicolo mal lubrificato, che scarica a terra la sua quantità di moto, corrisponde a un secchio bucato, fig. 3.10. L'acqua si spande sempre più nell'ambiente circostante, fino a che non la si nota più.

Una cattiva lubrificazione, cioè l'attrito, è quindi come una falla per la quantità di moto. Un veicolo ben lubrificato è come un secchio senza buchi.

Facciamo ora un nuovo esperimento con due vagoni (o due slitte su una rotaia a cuscino d'aria) con un respingente anelastico. I vagoni siano spinti in modo tale da muoversi l'uno verso l'altro alla stessa velocità. Si urtano e restano fermi, fig. 3.11. Ci chiediamo nuovamente: dov'è finita la quantità di moto? Questa volta non può essere fluita a terra, perché i due vagoni sono sempre senza attrito. Per di più: due oggetti che si urtassero in questo modo nello spazio, resterebbero fermi allo stesso modo, e nello spazio non c'è la Terra che può assorbire la quantità di moto. La risposta alla nostra domanda deve essere questa: le quantità di moto dei due vagoni si sono in un qualche modo annullate, compensate. Ma come è possibile?

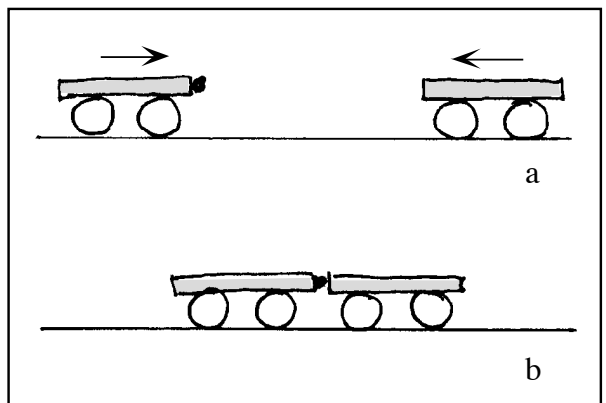


Fig. 3.11. Due carrelli si muovono alla stessa velocità l'uno verso l'altro. Nell'urto si fermano entrambi.

La spiegazione è molto semplice se contiamo la quantità di moto di un corpo come positiva e l'altra come negativa. Se prima dell'urto uno dei vagoni ha $+20 \text{ Hy}$ e l'altro -20 Hy , allora la quantità di moto totale è 0 Hy già prima dell'urto. L'esperimento dimostra che dopo l'urto è ancora 0 Hy - il bilancio coincide. Possiamo concludere:

La quantità di moto può assumere valori positivi e negativi.

Quale dei due corpi in fig. 3.11a ha la quantità di moto positiva e quale quella negativa? Possiamo deciderlo noi. Dalle lezioni di matematica sai che solitamente si traccia l'asse x rivolto verso destra. Facciamo la stessa cosa con la quantità di moto. Stabiliamo che:

La quantità di moto di un corpo è positiva se il corpo si muove verso destra, negativa se si muove verso sinistra.

Esercizi

1. Un vagone che contiene una quantità di moto di $1\,500 \text{ Hy}$, urta quattro vagoni fermi. Tutti i vagoni sono uguali e dopo l'urto restano agganciati. Qual è la quantità di moto totale dei cinque vagoni dopo l'urto? Che quantità di moto c'è in ognuno?
2. Due vagoni agganciati tra loro e con una quantità di moto totale di $12\,000 \text{ Hy}$, urtano un terzo vagone inizialmente fermo. Tutti i vagoni sono uguali e dopo l'urto restano agganciati. Che quantità di moto è contenuta in ogni vagone prima dell'urto? Che quantità di moto è contenuta in ogni vagone dopo l'urto?
3. Due slitte identiche si muovono l'una verso l'altra alla stessa velocità. Sono equipaggiate di un respingente elastico. La slitta a sinistra contiene una quantità di moto di $+5 \text{ Hy}$, quella a destra contiene -5 Hy . Cosa succede durante l'urto alla quantità di moto delle due slitte?
4. Due vagoni, con un totale di 500 Hy , si muovono verso destra e urtano un terzo vagone che va loro incontro. Il terzo vagone ha -200 Hy . (Tutti i vagoni sono uguali e dopo l'urto restano agganciati). Che quantità di moto è contenuta in ogni vagone dopo l'urto? In che direzione si muovono i vagoni?
5. Una palla colpisce orizzontalmente un muro e rimbalza alla stessa velocità con cui l'ha colpito. La sua quantità di moto prima dell'urto era 1 Hy . Qual è la quantità di moto dopo l'impatto? Quanto vale la differenza di quantità di moto tra prima e dopo? Dove è finita la quantità di moto mancante?

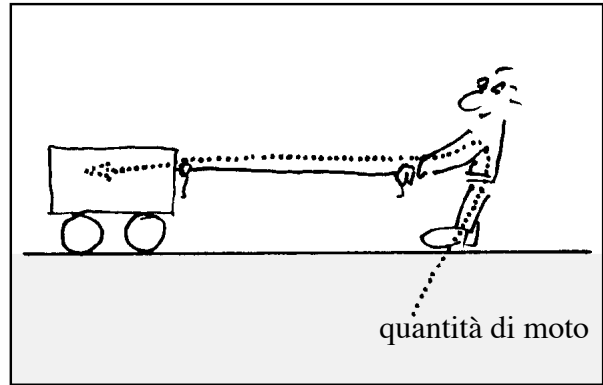


Fig. 3.12. Mentre la persona tira, la quantità di moto del carrello aumenta.

3.3 Pompe di quantità di moto

Prima ci eravamo chiesti dove finisce la quantità di moto di un corpo che perde velocità. Avevamo trovato: la quantità di moto fluisce a terra. Ci poniamo ora la domanda contraria: da dove riceve la sua quantità di moto un veicolo che viene accelerato?

Un carrello viene mosso con l'aiuto di una corda, fig. 3.12. Mentre la persona tira il carrello, quest'ultimo diventa più veloce e questo vuol dire: la sua quantità di moto aumenta. Da dove riceve il carrello la quantità di moto? Dalla persona che tira? Allora la quantità di moto della persona dovrebbe diminuire, cosa che non fa. La persona è ferma all'inizio e anche alla fine, la sua quantità di moto era ed è 0 Hy .

Possiamo però modificare l'esperimento in modo che la quantità di moto provenga veramente dalla persona, fig. 3.13. Quando la persona tira la corda, la quantità di moto del carrello a sinistra aumenta. Anche il carrello a destra, inclusa la persona, si mette in moto, ma verso sinistra. Acquista quantità di moto negativa, in altre parole: la sua quantità di moto diminuisce. Quindi, tirando, della quantità di moto è fluita dal carrello a destra (+ persona) al carrello a sinistra. A far fluire la quantità di moto da destra a sinistra ha provveduto la persona con i suoi muscoli. Ha funto da "pompa di quantità di moto".

Ora possiamo capire cosa dev'essere successo nel caso della figura 3.12: la persona ha pompato, attra-

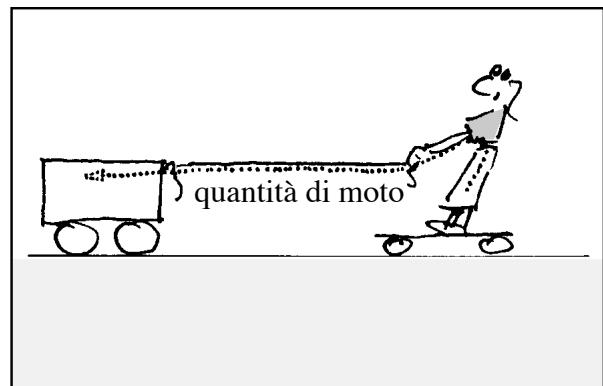


Fig. 3.13. La persona trasmette quantità di moto da destra a sinistra attraverso la corda.

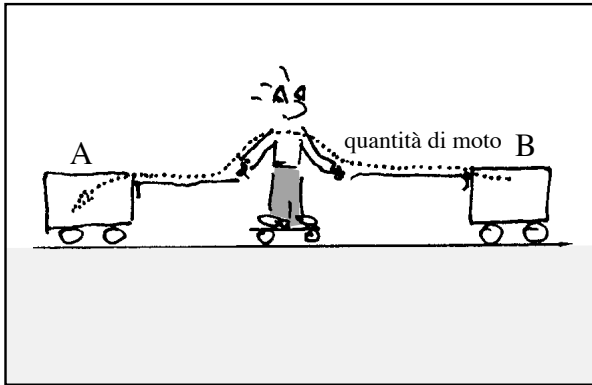


Fig. 3.14. La persona pompa quantità di moto dal carrello a destra in quello a sinistra.

verso la corda, della quantità di moto da terra al carrello. Che la quantità di moto della Terra diventi negativa è impercettibile come lo è il suo aumento quando un'auto frena (e così facendo cede quantità di moto alla Terra).

Facciamo ancora qualche esempio di come la quantità di moto possa venir pompata da un corpo all'altro.

La persona in fig. 3.14 tira i due carrelli A e B verso di sé in modo da farli muovere più in fretta. La quantità di moto di A aumenta e quella di B assume valori negativi sempre più grandi, cioè diminuisce. La quantità di moto della persona nel mezzo è e rimane 0 Hy. Quindi, la persona trasferisce quantità di moto dal carrello a destra in quello a sinistra. La persona è in piedi su uno skateboard per assicurarsi che nessuna quantità di moto arrivi da terra o finisca a terra.

Un'auto procede a velocità crescente, la sua quantità di moto aumenta. Qui è il motore a fungere da pompa di quantità di moto. Trasferisce quantità di moto da terra all'auto, attraverso le ruote motrici (di solito quelle anteriori), fig. 3.15.

Un'auto giocattolo telecomandata è appoggiata su un cartone sotto il quale vengono posti dei rulli, per esempio cannuce o matite, fig. 3.16. Facciamo partire l'auto verso destra. Nella fase iniziale, la sua quantità di moto aumenta. Contemporaneamente

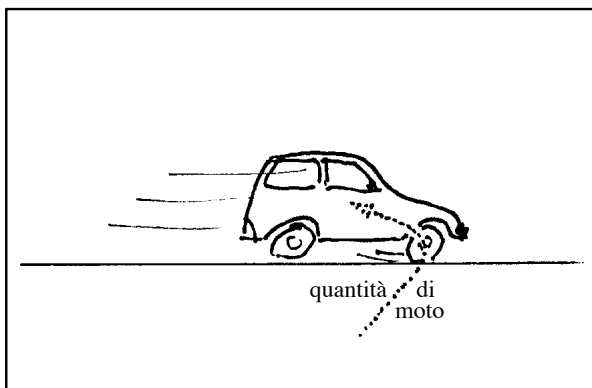


Fig. 3.15. Il motore dell'auto trasferisce quantità di moto da terra all'auto attraverso le ruote motrici.

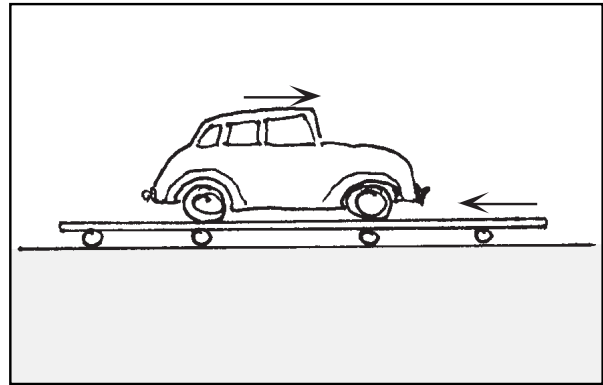


Fig. 3.16. Il motore dell'automobilina giocattolo pompa quantità di moto dal cartone nell'auto.

però, il cartone rotola verso sinistra, quindi la sua quantità di moto diventa negativa, diminuisce. Il motore dell'auto giocattolo ha quindi pompato quantità di moto dal cartone nell'auto.

Due carrelli (o slitte su una rotaia a cuscinio d'aria) sono trattenuti da una corda, fig. 3.17. Su uno dei carrelli è montato un respingente a molla. La corda è così corta che la molla è compressa. Tagliamo la corda e i due carrelli si metteranno in moto, quello a destra verso destra e quello a sinistra verso sinistra. Il carrello a destra acquista quantità di moto (positiva), quello a sinistra perde quantità di moto (positiva). In questo caso la pompa di quantità di moto è la molla. Mentre si distendeva ha trasferito quantità di moto dal carrello a sinistra in quello a destra.

3.4 Conduttori e non conduttori di quantità di moto

Abbiamo visto che la quantità di moto può essere trasferita da un corpo A a un corpo B. Diciamo anche che la quantità di moto *fluisce* da A verso B, oppure che fluisce una *corrente di quantità di moto* tra i corpi A e B.

Un presupposto indispensabile perché da A a B possa fluire quantità di moto, è che tra A e B ci sia un collegamento. Non basta però un collegamento

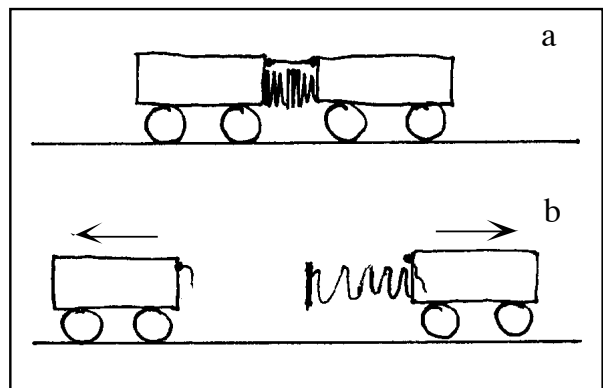


Fig. 3.17. La molla pompa quantità di moto dal carrello a sinistra in quello a destra.

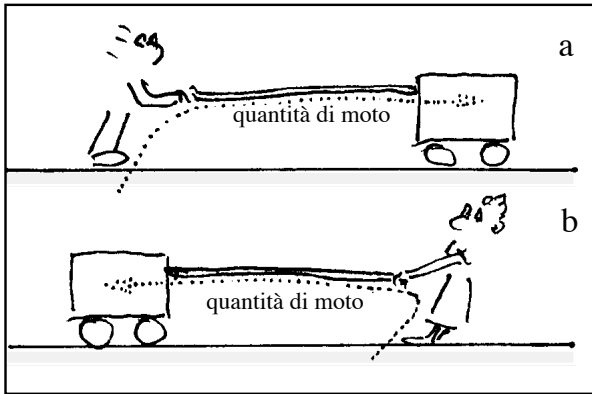


Fig. 3.18. Attraverso la sbarra fluisce quantità di moto da terra nel carrello. (a) Nella sbarra la quantità di moto fluisce verso destra. (b) Nella sbarra la quantità di moto fluisce verso sinistra.

qualsiasi, deve essere fatto in modo tale da risultare permeabile alla quantità di moto. Deve essere un collegamento "conduttore di quantità di moto". Che aspetto hanno questi collegamenti che conducono la quantità di moto? Quali oggetti conducono la quantità di moto? Quali non la conducono?

fig. 3.18a, una persona preme una sbarra contro un carrello. Il carrello diventa più veloce, la sua quantità di moto aumenta. Quindi la persona pompa quantità di moto da terra nel carrello. Nella sbarra, la quantità di moto fluisce da sinistra verso destra. Anche in fig. 3.18b un carrello viene caricato di quantità di moto - questa volta perché la persona tira il carrello, ancora grazie a una sbarra. In questo caso la quantità di moto fluisce nella sbarra da destra verso sinistra. Da questi processi capiamo che la sbarra è un conduttore di quantità di moto. È ovvio che ciò non dipende dalla forma esatta della sbarra e tantomeno dal materiale di cui è fatta, a condizione che sia rigida. Concludiamo:

I materiali rigidi conducono la quantità di moto.

La fig. 3.19 mostra una persona che crede ai miracoli. Tenta di mettere in moto il carrello spingendo l'aria - nella speranza che l'aria conduca la quantità di moto fino al carrello. Alla fine comunque si lascia convincere:

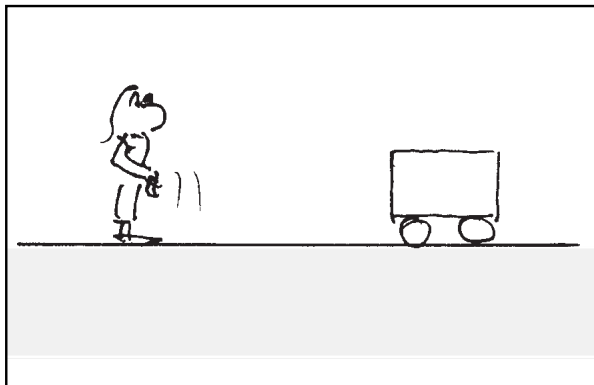


Fig. 3.19. La persona tenta inutilmente di spedire quantità di moto attraverso l'aria

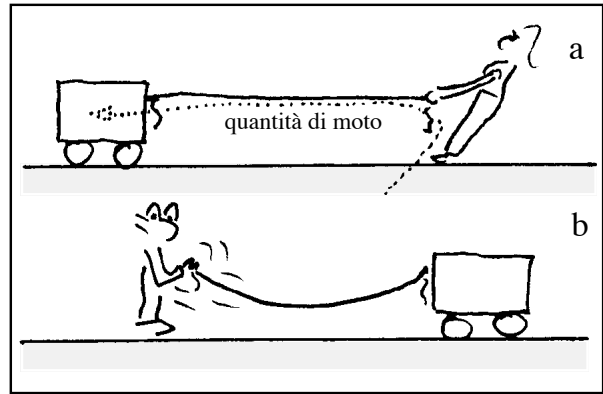


Fig. 3.20. Nella corda la quantità di moto può fluire da destra verso sinistra (a) ma non da sinistra verso destra (b).

L'aria non conduce la quantità di moto.

Vedremo più avanti che questa frase è valida entro certi limiti. In ogni caso ne abbiamo sfruttato la validità nel caso della rotaia a cuscinio d'aria: la presenza d'aria tra binario e slitta, impedisce alla quantità di moto di defluire dalla slitta al binario.

In fig. 3.20 qualcuno esamina la conducibilità di quantità di moto di una corda e constata che la quantità di moto fluisce bene da destra verso sinistra, fig. 3.20a, ma non fluisce per niente da sinistra verso destra, fig. 3.20b.

Le corde conducono la quantità di moto in una sola direzione.

Facciamo un esperimento che non è facile come i precedenti da spiegare. Su un carrellino viene fissata una calamita A, fig. 3.21. Le avviciniamo un'altra calamita B in modo che i poli uguali si stiano di fronte: il nord al nord e il sud al sud. Se con la calamita B ci avviciniamo a sufficienza alla calamita A, il carrellino si muove, la sua quantità di moto aumenta. Abbiamo pompato questa quantità di moto da terra, attraverso la calamita B e la calamita A, nel carrellino. Chiediamoci ora come la quantità di moto sia passata da B a A. Dall'osservazione concludiamo che tra le calamite deve esserci un collegamento. Tra le calamite deve esserci una struttura invisibile che conduce quantità di moto. Questa

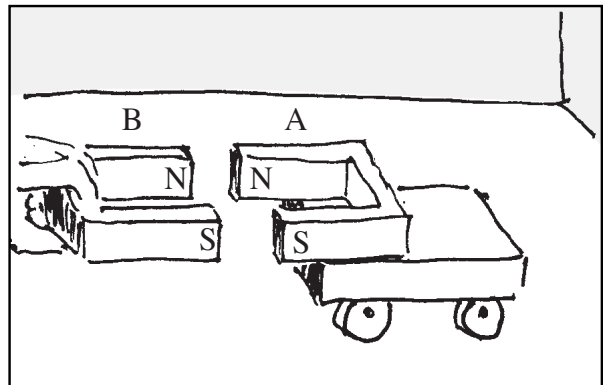


Fig. 3.21. Tra le calamite c'è un campo magnetico. Il campo è un conduttore di quantità di moto.

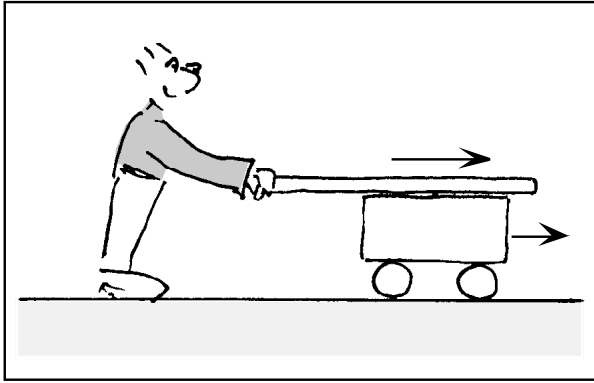


Fig. 3.22. Trasmissione di quantità di moto in un processo con attrito.

struttura che circonda ogni polo magnetico viene detta *campo magnetico*.

I campi magnetici conducono la quantità di moto.

La fig. 3.22 mostra una persona che carica di quantità di moto un carrello spingendo una sbarra appoggiata sul carrello stesso. Così facendo, la sbarra scivola sulla parte superiore del carrello, non vi è quindi fissata. In questa maniera si può veramente caricare un carrello di quantità di moto, ma in modo poco efficace. Si nota che la trasmissione di quantità di moto funziona meglio quando l'*attrito* tra sbarra e carrello è grande. Se la sbarra scivola facilmente sul carrello la corrente di quantità di moto dalla sbarra al carrello, sarà molto piccola. Se l'attrito è forte, ad esempio se la sbarra e il carrello hanno una superficie ruvida, la trasmissione di quantità di moto è buona. Concludiamo:

Sfregando due oggetti l'uno contro l'altro, della quantità di moto fluisce dall'uno all'altro: più l'attrito è grande, più ne fluisce.

In fondo abbiamo sempre presupposto la validità di questa regola: per evitare che la quantità di moto di un oggetto defluisca a terra, dobbiamo impedire che tra terra e oggetto ci sia un collegamento conduttore di quantità di moto; dobbiamo fare in modo che l'attrito sia minimo.

Il congegno più importante che permette di ridurre l'attrito tra la Terra e un corpo, è la ruota.

Le ruote fungono da isolatore di quantità di moto.

Esistono chiaramente altri metodi: l'aria per le rotaie a cuscino d'aria e anche per aerei ed elicotteri, le lame per i pattini e le slitte, l'acqua per le barche e le navi.

Esercizi

1. Le corde conducono la quantità di moto verso sinistra ma non verso destra. Inventi un congegno che non conduca la quantità di moto verso sinistra ma solamente verso destra.

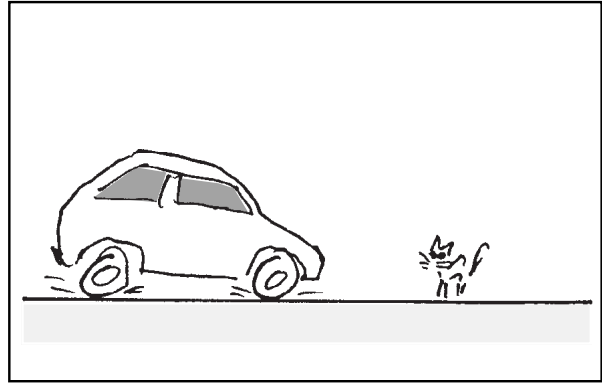


Fig. 3.23. Il veicolo deve disfarsi velocemente della sua quantità di moto

2. Un automobilista tenta di frenare bruscamente sul ghiaccio. Cosa succede? La conducibilità di quantità di moto ha un ruolo importante nella frenata. Cosa si può dire al riguardo nel caso del ghiaccio?

3. Un automobilista tenta di partire velocemente sul ghiaccio. Cosa succede?

3.5 Propulsori e freni

Le ruote sono non-conduttori di quantità di moto solo quando girano liberamente. Le ruote motrici di un'automobile non sono degli isolatori per la quantità di moto. Attraverso il motore sono collegate al telaio e alla carrozzeria - così che il motore possa pompare quantità di moto da terra all'auto.

Spesso ci si vuole liberare il più rapidamente possibile della quantità di moto contenuta in un veicolo, fig. 3.23. A questo scopo i veicoli hanno dei freni. Frenando, si aumenta notevolmente l'attrito delle ruote; le ruote vengono trasformate in buoni conduttori di quantità di moto, così che la quantità di moto del veicolo possa defluire rapidamente a terra. Un freno è quindi un conduttore per la quantità di moto che si può "aprire" e "chiudere", una specie di valvola o interruttore, per la corrente di quantità di moto.

Un'auto che viaggia velocemente non perde quantità di moto solo a causa dell'attrito delle ruote, ma anche per l'attrito tra la sua superficie e l'aria. A velocità superiori a circa 80 km/h diventa addirittura questa la principale causa di perdita di quantità di moto. In questo processo la quantità di moto fluisce inizialmente nell'aria. Che l'aria contenga effettivamente questa quantità di moto, si capisce dal fatto che appena passata l'auto, l'aria si muove turbinosamente. A poco a poco però cede la sua quantità di moto alla Terra (nuovamente per attrito).

Anche l'esperimento rappresentato in fig. 3.24 mostra che nell'aria può essere contenuta quantità di moto. Un palloncino viene montato su un carrello. Se apriamo il palloncino e lasciamo andare il carrello, questo si metterà in moto. Il palloncino si

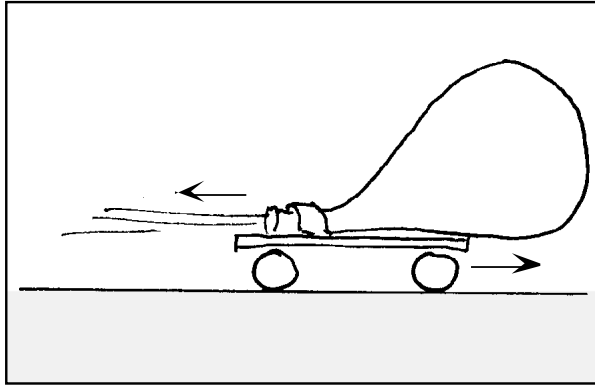


Fig. 3.24. L'aria che esce dal palloncino riceve quantità di moto negativa, il carrello quantità di moto positiva.

contrae, spingendo l'aria che contiene verso sinistra. L'aria riceve quantità di moto negativa, il carrello positiva.

Il propulsore del carrello in fig. 3.24 funziona sostanzialmente come quello di un razzo. Anche un razzo acquista quantità di moto grazie al fatto che espelle gas ad alta velocità. In un razzo la parte più grande è occupata da due serbatoi, fig. 3.25. Uno contiene il carburante, per esempio idrogeno liquido, l'altro contiene ossigeno liquido. La combustione dell'idrogeno produce vapore acqueo ad alta pressione. Esce dalla parte posteriore del razzo ad alta velocità e si porta dietro la quantità di moto. In questo modo il razzo acquista quantità di moto di segno opposto.

Le navi vengono spinte da *eliche*, fig. 3.26, che girano sotto la superficie e che sono azionate dal motore della nave. L'elica spinge all'indietro l'acqua, caricandola con quantità di moto negativa. La nave riceve la corrispondente quantità di moto posi-

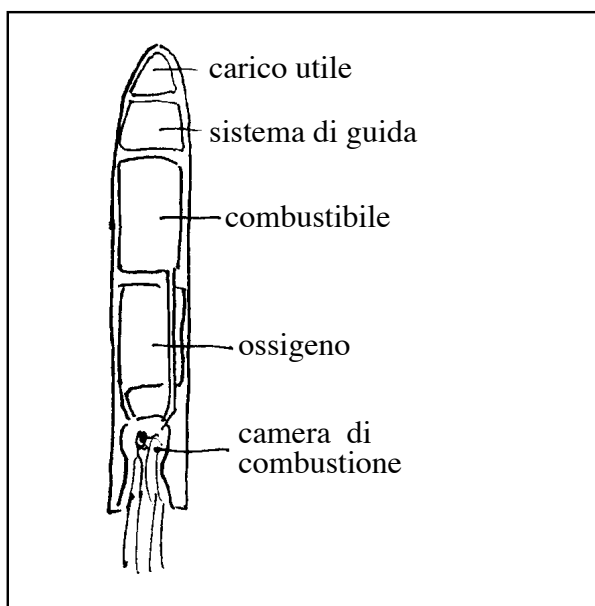


Fig. 3.25. Struttura di un razzo

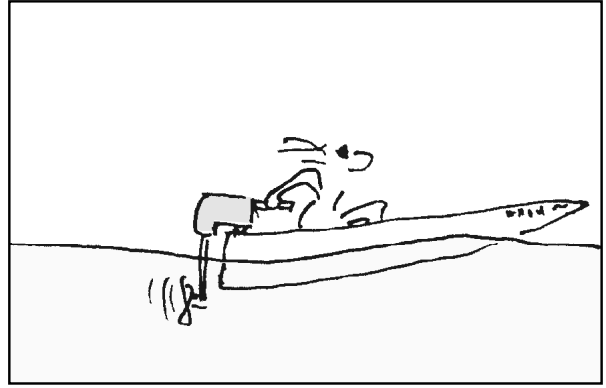


Fig. 3.26. L'elica pompa quantità di moto dall'acqua alla barca.

tiva. In altre parole: l'elica pompa quantità di moto (positiva) dall'acqua alla nave. Quando la nave deve frenare, l'elica viene fatta girare nell'altro senso e pompa quantità di moto dalla nave all'acqua.

I propulsori degli aerei lavorano come quelli delle navi. La quantità di moto non viene estratta dall'acqua ma dall'aria.

In un aereo a elica, sono le eliche a pompare quantità di moto dall'aria all'aereo. In un jet questo è compito del *motore a reazione*. In sostanza un motore a reazione non è altro che un potente ventilatore nascosto nel telaio del motore e azionato da una turbina. La turbina ottiene l'energia dal cherosene, un carburante simile alla benzina.

Gli aerei devono frenare in fretta dopo l'atterraggio: devono perdere in fretta la loro quantità di moto. Possono fare come le auto e far defluire a terra la quantità di moto attraverso le ruote, ma il metodo dell'*inversione di spinta* è più efficace. In certi aerei è facile osservarlo anche dall'interno, attraverso gli oblò. Dietro ogni motore vengono posizionati dei deviatori che rimandano in avanti l'aria espulsa dai motori, fig. 3.27. L'aria riceve così quantità di moto positiva dall'aereo e di conseguenza la quantità di moto dell'aereo diminuisce (abbiamo assunto che l'aereo si muovesse verso destra).

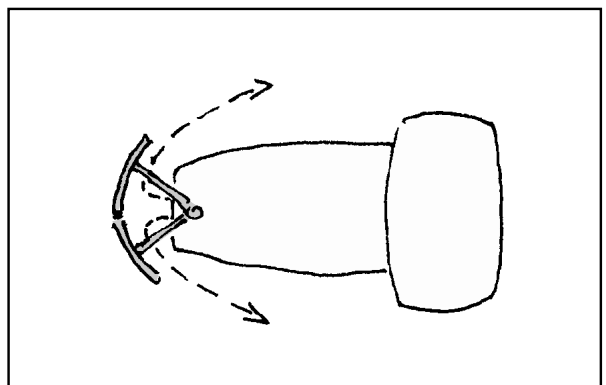


Fig. 3.27. Motore a reazione durante l'inversione di spinta: l'aereo cede quantità di moto all'aria

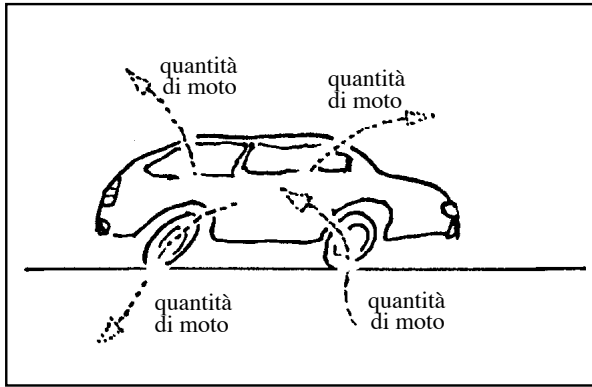


Fig. 3.28. Auto che viaggia a velocità costante. Tutta la quantità di moto che il motore pompa nell'auto defluisce di nuovo nell'ambiente a causa dell'attrito.

Esercizi

1. Da dove riceve una barca a vela la quantità di moto?
2. Una nave si muove a velocità costante, cioè la sua quantità di moto non cambia. Dove finisce la quantità di moto che il motore pompa costantemente nella nave?

3.6 Equilibri dinamici

Un'automobile accelera: il motore pompa in continuazione quantità di moto da terra all'auto. Più la velocità dell'auto è elevata, maggiore diventa l'attrito dell'aria e più quantità di moto perde. Si raggiungerà una velocità alla quale la quantità di moto che viene pompata nell'auto equivarrà a quella che defluisce a causa dell'attrito. Il bilancio è nullo, la quantità di moto dell'auto non aumenta più, fig. 3.28.

Questo è quanto succede a un'auto che procede a velocità costante su un tratto orizzontale. L'afflusso di quantità di moto è uguale al deflusso.

Anche questa situazione può essere confrontata con una dove l'acqua assume il ruolo della quantità di moto, fig. 3.29: il secchio con il foro corrisponde all'auto. Il secchio ha una falla per l'acqua così come l'auto ha una falla per la quantità di moto. Nel sec-

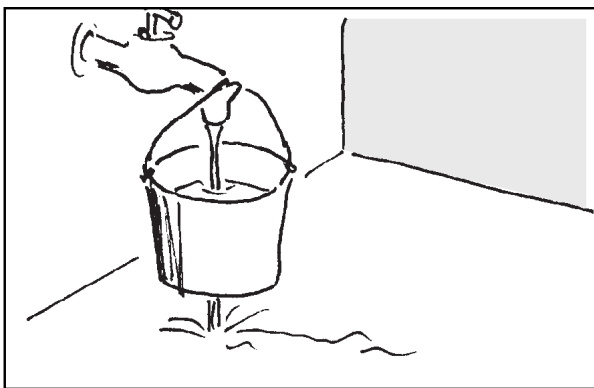


Fig. 3.29. Attraverso il foro defluisce tanta acqua quanta ne affluisce dal rubinetto. La quantità d'acqua nel secchio resta costante.

chio continua a fluire acqua, ma esattamente altrettanta ne esce dal foro, così che la quantità d'acqua nel secchio non cambia.

Un processo nel quale la corrente di deflusso si assesta in modo da equivalere alla corrente di afflusso, viene detto *equilibrio dinamico*.

Equilibrio dinamico: la corrente di deflusso si stabilizza ad un valore equivalente a quello della corrente di afflusso.

Spesso c'è equilibrio dinamico quando qualche cosa si muove a velocità costante.

Così, grazie ai pedali un ciclista pompa quantità di moto nella bicicletta (+ persona). Una corrente della stessa intensità defluisce a causa dell'attrito attraverso le ruote e l'aria. Lo stesso vale per aerei e navi.

Esercizi

1. Descrivi le seguenti situazioni specificando cosa succede alla quantità di moto.

- (a) Un'auto parte.
- (b) Un'auto procede lentamente in folle.
- (c) Un'auto frena.
- (d) Un'auto procede a velocità elevata e costante.

2. Abbiamo visto precedentemente un processo dove un corpo si muove a velocità costante senza che ci sia equilibrio dinamico. Perché in quel caso la quantità di moto restava costante?

3.7 La direzione delle correnti di quantità di moto

Il seguente esperimento può solo essere immaginato visto che avremmo bisogno di un treno in corsa.

In un vagone ferroviario V in moto verso destra, fig. 3.30, un oggetto O viene gettato per terra in modo da scivolare verso destra. La velocità di O subito dopo aver toccato il pavimento è quindi maggiore di quella del treno. L'oggetto però si "ferma" quasi subito.

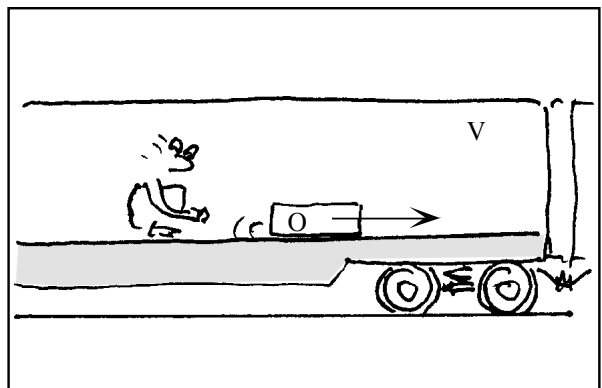


Fig. 3.30. Un oggetto scivola sul pavimento di un vagone ferroviario.

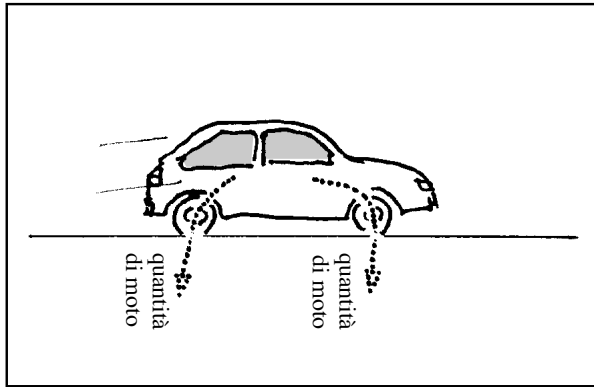


Fig. 3.31. Auto in folle. La quantità di moto fluisce dal corpo a velocità maggiore verso quello a velocità minore.

Con fermo vogliamo dire che non si muove rispetto al treno. Per dirla diversamente: ora si muove alla stessa velocità del vagone. Durante la scivolata, la quantità di moto di O è diminuita, da O a V è fluita quantità di moto.

Lanciamo di nuovo O sul pavimento, ma questa volta verso sinistra. Adesso la sua velocità è inizialmente minore di quella del treno. Ancora una volta però, le due velocità si uguagliano in fretta. La quantità di moto dell'oggetto O , durante la scivolata aumenta. Quindi, dal vagone V all'oggetto O fluisce quantità di moto.

Hai notato che per la direzione in cui fluisce la corrente di quantità di moto, vale una semplice regola? In entrambi i casi, la quantità di moto fluisce dal corpo con la velocità più grande verso il corpo con la velocità più piccola: nel primo caso da O verso V , nel secondo caso da V verso O . Questa regola vale sempre quando il flusso di quantità di moto è causato dall'attrito. Anche nel caso dell'auto in folle, fig. 3.31, la quantità di moto fluisce dal corpo con la velocità maggiore (l'auto) a quello con velocità minore (la Terra, che ha velocità 0 km/h).

Ogni volta che la quantità di moto deve fluire nell'altro senso, cioè dal corpo a velocità minore verso quello a velocità maggiore, si deve usare una pompa di quantità di moto.

La regola è quindi:

La quantità di moto fluisce spontaneamente da un corpo a velocità maggiore verso un corpo a velocità minore. Una "pompa di quantità di moto" (motore, persona) la trasporta nella direzione opposta.

3.8 Compressione e trazione

In fig. 3.32a qualcuno mette in moto un carrello. Attraverso la sbarra fluisce quantità di moto da sinistra verso destra. In fig. 3.32b il carrello continua a muoversi da solo. La sua quantità di moto non cambia più (trascurando le perdite dovute all'attrito). Attraverso la sbarra non fluisce nessuna quantità di moto. Nella fig. 3.32c la sbarra è attraversata dalla quantità di moto che fluisce da destra verso sinistra.

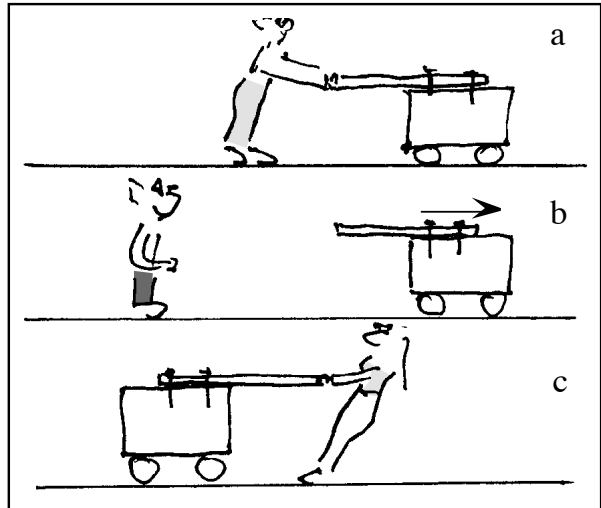


Fig. 3.32. (a) Nella sbarra fluisce quantità di moto verso destra. (b) Nella sbarra non fluisce quantità di moto. (c) Nella sbarra fluisce quantità di moto verso sinistra.

Immagina ora di essere al posto della sbarra. Noteresti una differenza nei tre casi? Naturalmente. Dopo tutto le braccia si possono considerare come il prolungamento della sbarra e la persona nota una differenza fra le tre situazioni. Nel primo caso percepisce compressione, nel terzo trazione e nel secondo caso né compressione né trazione.

Queste affermazioni possono essere riferite anche alla sbarra. Nel primo caso è sottoposta a compressione, nel secondo è a riposo e nel terzo è sottoposta a trazione. Abbiamo quindi la seguente regola:

Corrente di quantità di moto verso destra: compressione

Corrente di quantità di moto verso sinistra: trazione

Vogliamo convincerci della validità di questa regola con un altro esempio. La fig. 3.33a mostra un autotreno che sta partendo. Il suo motore pompa quantità di moto da terra nell'autocarro e, attraverso il gancio di traino, verso sinistra nel rimorchio. Sappiamo che l'asta d'aggancio è sottoposta a trazione - in accordo con la nostra regola.

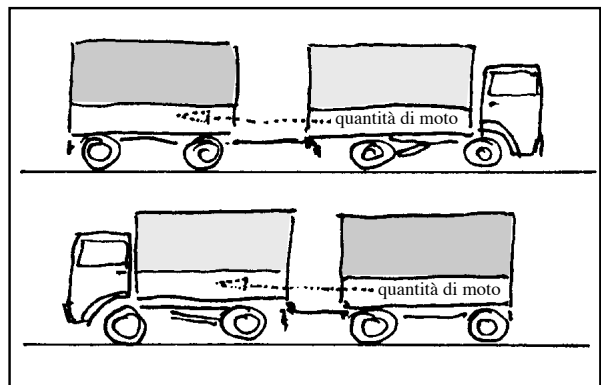


Fig. 3.33. Un autotreno viaggia una volta verso destra (a) e un'altra verso sinistra (b). In entrambi i casi l'asta d'aggancio è sottoposta a trazione e in entrambi i casi la quantità di moto fluisce verso sinistra.

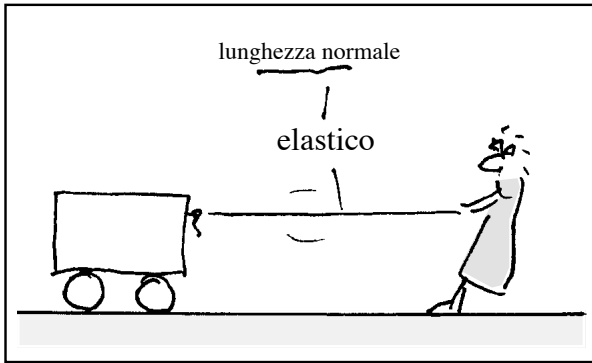


Fig. 3.34. Attraverso la corda elastica, fluisce una corrente di quantità di moto verso sinistra. La corda è sottoposta a trazione e si allunga.

Consideriamo ora un autotreno che parte verso sinistra, fig. 3.33b. Qui il motore pompa nell'auto-carro quantità di moto negativa, cioè ne estrae quantità di moto positiva. Attraverso l'asta d'aggancio fluisce quindi verso sinistra della quantità di moto (positiva). Ovviamente anche in questo caso l'asta è sottoposta a trazione. Quindi anche in questo caso la nostra regola è valida.

Guardando una sbarra non si può capire se è sottoposta a compressione, a trazione o a nessuna delle due. Come dire che non si riesce a capire in che direzione fluisce la corrente di quantità di moto. Ci sono però oggetti che mostrano chiaramente il loro stato di tensione: sono tutti quegli oggetti che si deformano elasticamente, come elastici di gomma o molle d'acciaio.

Questi oggetti si allungano se sottoposti a trazione e si accorciano se sottoposti a compressione. Osservandoli si può quindi capire in che direzione fluisce la corrente di quantità di moto che li attraversa, fig. 3.34 e fig. 3.35.

Riassumiamo:

Allungamento:

trazione, corrente di quantità di moto verso sinistra

Accorciamento:

compressione, corrente di quantità di moto verso destra

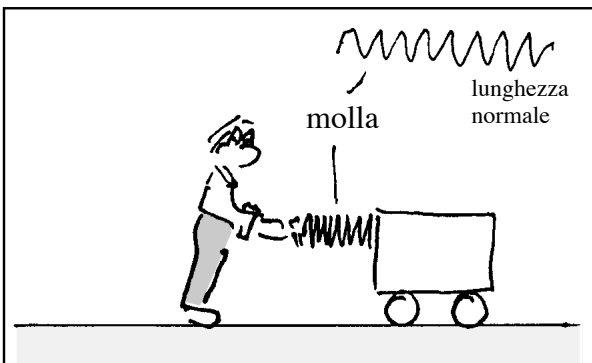


Fig. 3.35. Attraverso la molla fluisce una corrente di quantità di moto verso destra. La molla si accorcia.

Esercizi

1. Un'auto che viaggia verso sinistra, frena improvvisamente. Da dove a dove fluisce la quantità di moto? Viene rispettata la regola secondo la quale la quantità di moto fluisce dal corpo con velocità maggiore verso quello con velocità minore?
2. Una persona spinge un carrello accelerandolo verso sinistra. Così facendo, le sue braccia sono sottoposte a compressione. In che direzione fluisce la corrente di quantità di moto nelle braccia?
3. Un autotreno viaggia verso destra a velocità costante ed elevata. A che tipo di tensione (compressione o trazione) è sottoposta l'asta d'aggancio? Fai uno schizzo con il percorso della quantità di moto.

3.9 Circuiti di quantità di moto

Può succedere che da qualche parte fluisca una corrente di quantità di moto e, malgrado ciò, in nessun punto cambi la quantità di moto presente. La fig. 3.36 mostra un esempio: una persona trascina una cassa a velocità costante sul pavimento.

Invece di una cassa la persona potrebbe anche trainare a velocità costante un carrello. Per le nostre considerazioni, la cassa ha il vantaggio di permetterci di vedere chiaramente il punto dove avviene l'attrito: la superficie di contatto tra la cassa e il pavimento. Nelle ruote non c'è attrito solamente nei cuscinetti a sfera ma anche nei pneumatici e nella superficie di contatto tra pneumatico e suolo.

Poniamoci ora di nuovo la vecchia domanda: qual è il percorso seguito dalla quantità di moto? Rispondere non ti dovrebbe essere difficile. La persona pompa quantità di moto da terra, attraverso la corda, nella cassa. Dalla cassa rifluisce a terra a causa dell'attrito tra il fondo della cassa e il pavimento. Potremmo quindi dire che la quantità di moto fluisce "in cerchio", anche se non ne conosciamo il percorso esatto attraverso la Terra.

Ancora una volta si può simulare questa situazione con una corrente d'acqua. Sai come?

La fig. 3.37 mostra una variante dell'esperimento di fig. 3.36: la cassa non viene trascinata sul pavimen-

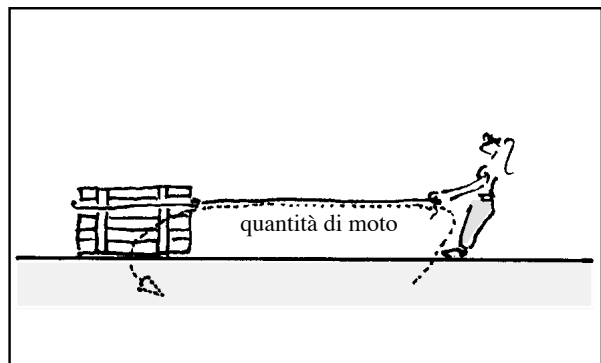


Fig. 3.36. Anche se c'è una corrente di quantità di moto, la quantità di moto non si accumula da nessuna parte.

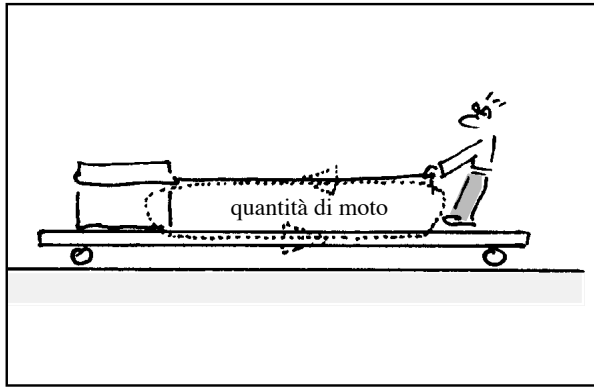


Fig. 3.37. Circuito chiuso di quantità di moto

to, ma su una tavola a sua volta appoggiata su dei rulli. Visto che la tavola è sui rulli, la quantità di moto non può defluire a terra e la persona non può pompare quantità di moto da terra. Perciò, la persona in un primo tempo pompa quantità di moto dalla tavola, la quantità di moto fluisce attraverso la corda e nella cassa, da dove fluisce nuovamente nella tavola, per continuare verso destra fino alla persona. Quindi, la quantità di moto fluisce in "cerchio" anche in questo caso. E questa volta il percorso è conosciuto per intero. Si dice anche che la quantità di moto forma un *circuito*.

Che la quantità di moto fluisca veramente verso sinistra nella corda e verso destra nella tavola, si capisce con un'ulteriore variante dell'esperimento, fig. 3.38. Sia la corda che la tavola sono interrotte da una molla. Le molle ci indicano in che direzione fluisce la corrente di quantità di moto. La molla nella corda è allungata, è quindi sottoposta a trazione e ciò significa che la corrente fluisce verso sinistra. La molla tra le due metà della tavola è compressa, è quindi sottoposta a compressione e ciò significa che qui la quantità di moto fluisce verso destra.

La quantità di moto può fluire in circuito chiuso. In quel caso la quantità di moto non aumenta né diminuisce in nessun punto. In ogni circuito di quantità di moto, c'è una parte sottoposta a compressione e un'altra sottoposta a trazione.

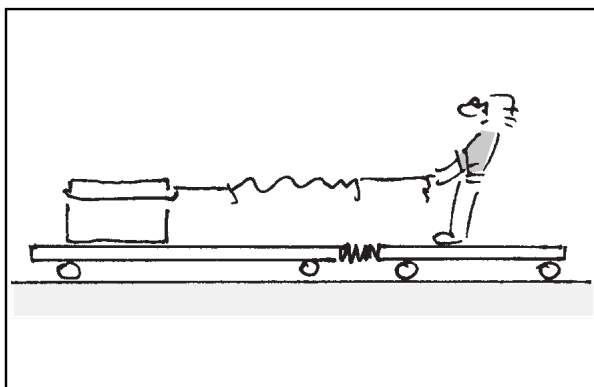


Fig. 3.38. Le molle indicano la direzione della corrente di quantità di moto.

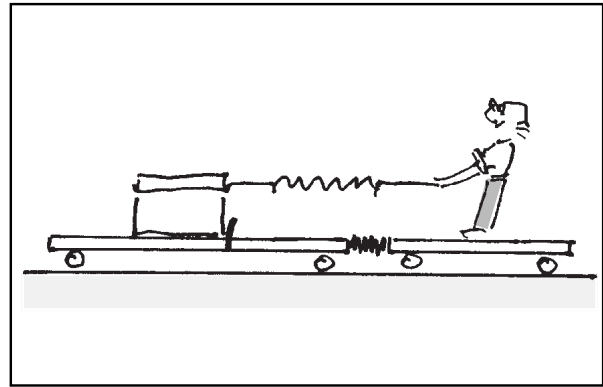


Fig. 3.39. La cassa non si muove. Ciò malgrado fluisce una corrente di quantità di moto.

Modifichiamo nuovamente l'esperimento e precisamente in due passi successivi. Per prima cosa blocchiamo la cassa, fig. 3.39. La persona tira ancora ma la cassa non si può muovere. Ci rendiamo conto che così la persona non è più nemmeno necessaria: basta trovare un modo di fissare l'estremità destra della corda tesa, fig. 3.40. Come prima la corda è sottoposta a trazione, la tavola a compressione. Ciò significa che la quantità di moto continua a circolare nel circuito - e questo anche se niente più si muove, addirittura senza più avere una "pompa di quantità di moto".

Che qualcosa possa scorrere senza spinta ti sorprenderà. Dopotutto abbiamo già visto, nel capitolo 3, che se vogliamo far fluire una corrente abbiamo bisogno di spinta. Constatiamo ora che la regola non è sempre valida. Esistono correnti senza spinta. Non aver bisogno di spinta, naturalmente vuol dire che alla corrente non viene opposta nessuna resistenza.

Vedrai più tardi che anche le correnti elettriche di solito necessitano una spinta, ma che esistono dei conduttori elettrici che non hanno resistenza, i *superconduttori*. In un circuito elettrico fatto da materiali superconduttori, la corrente elettrica può fluire senza spinta.

I circuiti elettrici senza resistenza sono rari, invece i circuiti di quantità di moto senza resistenza sono frequenti. Le figg. 3.41 e 3.42 mostrano due esempi.

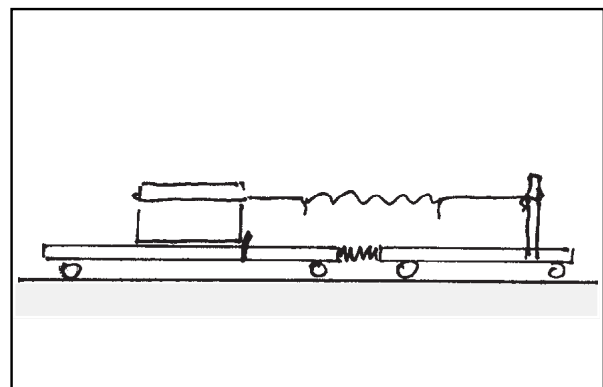


Fig. 3.40. Corrente di quantità di moto senza spinta.

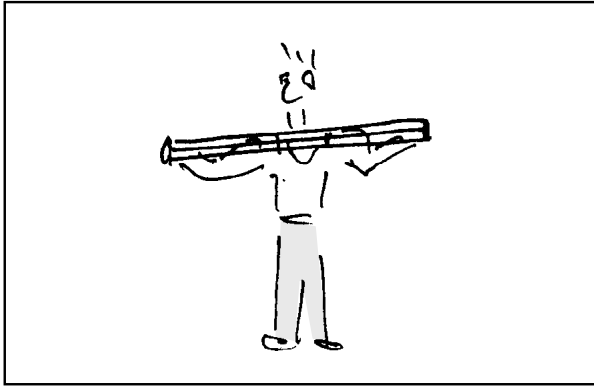


Fig. 3.41. Circuito chiuso di quantità di moto

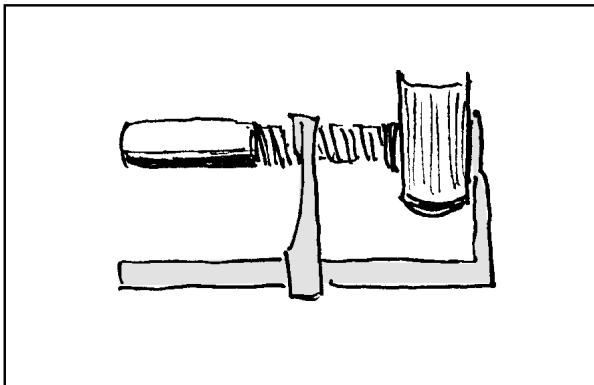


Fig. 3.42. Circuito chiuso di quantità di moto

Esercizi

1. Un trattore sta tentando di sradicare un albero, fig. 3.43a. Schizza il percorso della quantità di moto.
2. La fig. 3.43b mostra una corda da bucato tesa. Schizza il percorso della quantità di moto. Dove c'è trazione, dove compressione?
3. Come si può realizzare una corrente di materia senza resistenza? Esiste qualcosa del genere in natura?

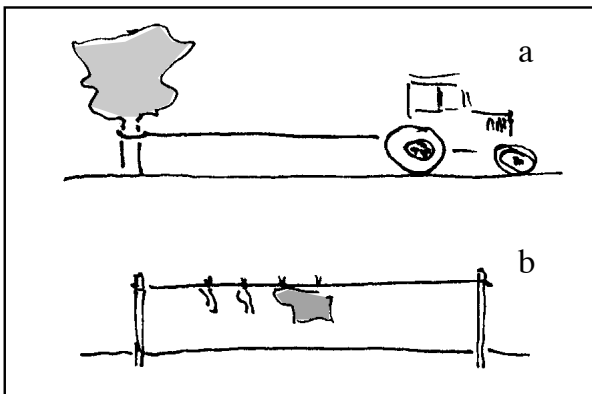


Fig. 3.43. Per gli esercizi 1 e 2

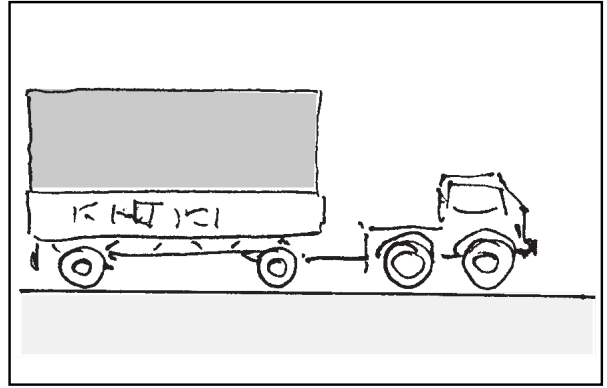


Fig. 3.44. Dalla motrice al rimorchio fluisce una corrente di quantità di moto costante nel tempo.

3.10 L'intensità della corrente di quantità di moto

Dalla motrice in fig. 3.44, fluisce nel rimorchio una corrente costante di quantità di moto: fluisce un certo numero di huygens al secondo attraverso l'asta d'aggancio. Chiamiamo *intensità della corrente di quantità di moto*, la quantità di moto che fluisce in un conduttore, divisa per l'intervallo di tempo.

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

Si può scrivere la stessa equazione in modo più breve, utilizzando al posto delle grandezze i simboli corrispondenti:

p = quantità di moto

F = intensità della corrente di quantità di moto

t = tempo

Otteniamo quindi:

$$F = \frac{p}{t}$$

Se ad esempio attraverso il gancio di traino in fig. 3.44 fluissero ogni secondo 500 Hy, allora:

$$F = 500 \text{ Hy/s.}$$

Per l'unità di misura Hy/s utilizziamo l'abbreviazione *newton* (N):

$$N = \frac{\text{Hy}}{\text{s}}$$

Così, per l'intensità della corrente di quantità di moto possiamo scrivere:

$$F = 500 \text{ N.}$$

L'unità di misura dell'intensità della corrente di quantità di moto, prende nome da Isaac Newton (1643-1727). Newton diede alla meccanica sostanzialmente quella forma in cui ancora oggi l'impariamo. Tra le altre cose anche l'equazione $F = p/t$ risale a Newton.

Le intensità delle correnti di quantità di moto si lasciano misurare facilmente, precisamente con un

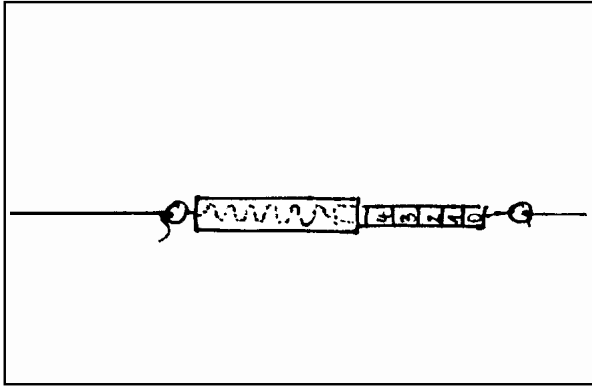


Fig. 3.45. Dinamometro

cosiddetto dinamometro, fig. 3.45. Un dinamometro è fatto essenzialmente da una molla d'acciaio che si allunga tanto più, quanto maggiore è il flusso di quantità di moto che la attraversa. La scala è tarata in newton.

La fig. 3.46 mostra come si usa un dinamometro. Si deve misurare l'intensità della corrente di quantità di moto che fluisce attraverso la corda in fig. 3.46a. Si taglia la corda in un punto qualsiasi e si legano le due estremità così ottenute ai ganci del dinamometro, fig. 3.46b.

In fig. 3.47a viene misurata due volte consecutive l'intensità della stessa corrente di quantità di moto. Ovviamente, entrambi i dinamometri segnano lo stesso valore, lo stesso che sarebbe segnato anche da un dinamometro solo.

Come per le correnti d'acqua, anche per le correnti di quantità di moto possono esserci delle ramificazioni. La fig. 3.47b ne dà un esempio. In questo caso la somma delle intensità delle correnti nelle corde A e B, deve essere uguale all'intensità della corrente nella corda C. Abbiamo applicato la regola dei nodi che già conosci per le correnti d'acqua (vedi paragrafo 2.5).

Le intensità delle correnti che fluiscono in un nodo sono complessivamente uguali alle intensità delle correnti che escono dal nodo.

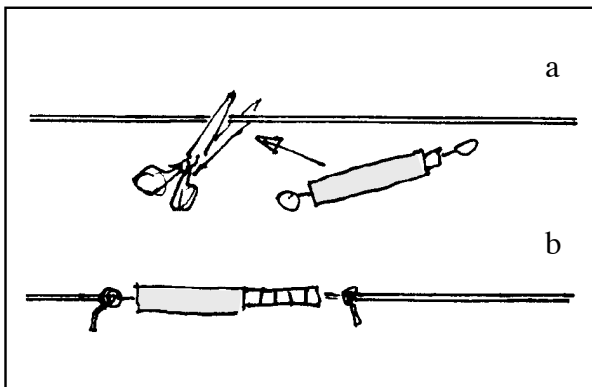


Fig. 3.46. (a) Si vuole misurare l'intensità della corrente di quantità di moto in una corda. (b) Si taglia la corda e si aggancia il dinamometro alle estremità così ottenute.

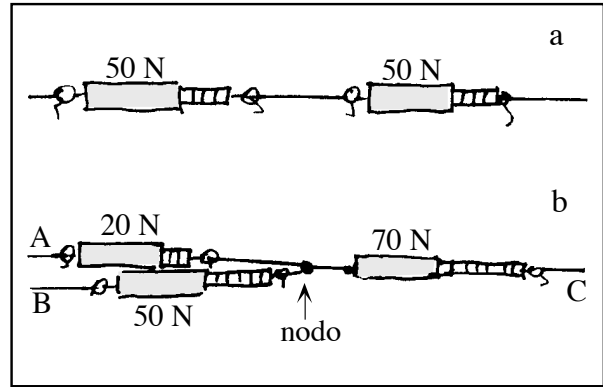


Fig. 3.47. (a) Una corrente attraversa consecutivamente due dinamometri. (b) Ramificazione di una corrente di quantità di moto

Esercizi

1. In un carrello privo di attrito fluisce una corrente di quantità di moto di intensità costante. In 10 secondi si accumula una quantità di moto di 200 huygens. Qual era l'intensità della corrente?
2. Durante la partenza di un autotreno, il gancio di traino è attraversato da una corrente di quantità di moto di 6000 N. Che quantità di moto ha il rimorchio dopo 5 s? (Le perdite dovute all'attrito siano trascurabili).
3. Cosa segnano i dinamometri C e D in fig. 3.48a?
4. Le casse in fig. 3.48b sono trascinate sul pavimento a velocità costante. Quanto intensa è la corrente di quantità di moto che defluisce a terra dalla cassa a sinistra? Quanto intensa è quella che defluisce a terra dalla cassa a destra?
5. In un veicolo, il cui attrito è trascurabile, fluisce una corrente di quantità di moto costante di 40 N. Rappresenta graficamente la quantità di moto in funzione del tempo.

3.11 La forza

Lo scopo di questo paragrafo è unicamente introdurre un nuovo nome per un concetto già noto.

L'espressione "intensità della corrente di quantità di moto" esiste solo dall'inizio del novecento. La grandezza esiste però già dai tempi di Newton, vale a dire da circa 300 anni. A quei tempi però, alla gran-

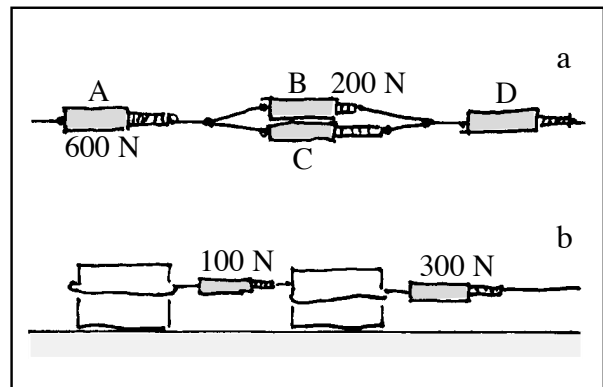


Fig. 3.48. (a) Per l'esercizio 3. (b) Per l'esercizio 4

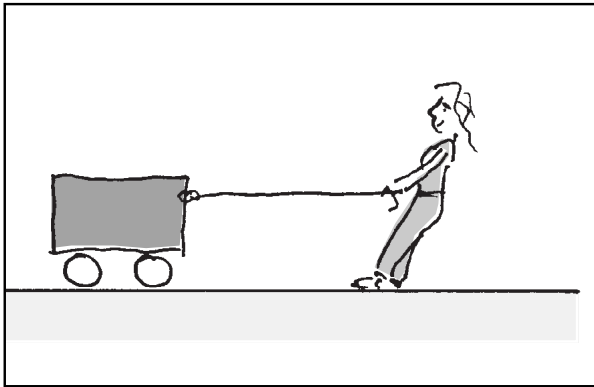


Fig. 3.49. La persona esercita una forza sul carrello. In questo modo la quantità di moto del carrello cambia.

dezza fu dato un altro nome: venne chiamata *forza*. F è la prima lettera della parola inglese "force", che significa appunto forza. Il nome forza per la grandezza F è a tutt'oggi molto usato, viene addirittura utilizzato più spesso di intensità della corrente di quantità di moto. Dobbiamo quindi abituarci al suo uso. A questo punto sorge però un problema: anche se "forza" si riferisce alla stessa grandezza fisica chiamata "intensità della corrente di quantità di moto", i termini sono usati in modo molto diverso. Chiameremo la descrizione che fa uso delle intensità delle correnti, *modello di corrente di quantità di moto* e una che fa uso delle forze *modello di forza*.

In greco, forza si dice *dynamos*: ciò ti fa capire come mai lo strumento che misura la corrente di quantità di moto sia chiamato dinamometro.

Per fare pratica con il modello di forza riferiamoci alle figg. 3.49 e 3.50. Nella fig. 3.49 una persona traina un carrello privo di attrito in modo da muoverlo verso destra. Prima, come pro memoria, la descrizione nel modello di corrente di quantità di moto: la persona pompa quantità di moto da terra nel carrello attraverso la corda. Così facendo la quantità di moto del carrello aumenta. Nel modello di forza lo stesso processo viene descritto così: sul carrello agisce una forza e di conseguenza la quantità di moto del carrello aumenta.

La descrizione della fig. 3.50 è un po' più difficile. Due molle A e B sono agganciate a un carrello, la molla A tira verso sinistra, la molla B verso destra. Naturalmente i due dinamometri segnano lo stesso valore; facciamo 50 N. Anche in questo caso cominciamo dalla descrizione nel modello di corrente di quantità di moto: da terra fluisce una corrente di quantità di moto di 50 N che da destra, attraverso la molla B, giunge al carrello e da lì, attraverso la molla A, nuovamente a terra. Nel modello di forza la descrizione è la seguente: la molla A esercita sul carrello una forza orientata verso sinistra di 50 N, la molla B esercita sul carrello una forza orientata verso destra dello stesso valore, cioè 50 N. Visto che le forze hanno lo stesso valore ma agiscono in direzioni opposte, la quantità di moto del carrello non cambia.

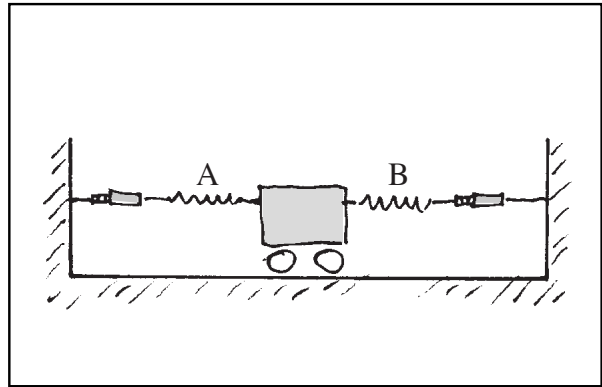


Fig. 3.50. La molla A esercita sul carrello una forza diretta verso sinistra, la molla B verso destra. Visto che le forze hanno la stessa intensità, la quantità di moto del carrello non cambia.

3.12 Misurazione dell'intensità della corrente di quantità di moto

Vorremmo costruire da soli un apparecchio per la misurazione della corrente di quantità di moto. Facciamo finta che i dinamometri non siano ancora stati inventati e che l'unità di misura dell'intensità della corrente di quantità di moto non sia ancora stata fissata.

Cominciamo dalla definizione della nostra unità di misura. Per farlo abbiamo bisogno di un gran numero di elastici dello stesso tipo. Ne teniamo uno davanti a un righello, allungandolo completamente ma senza tirare, fig. 3.51, e misuriamo la sua lunghezza. Mettiamo che siano 10 cm = 0,1 m. Visto che l'elastico non è allungato, non è ancora attraversato da nessuna corrente di quantità di moto. Ora lo tendiamo finché diventa lungo 15 cm. Ovviamente ora fluisce una corrente di quantità di moto. Definiamo come unità dell'intensità della corrente, proprio l'intensità di questa corrente di quantità di moto. (Visto che l'elastico è fatto da due fili di gomma, ognuno dei fili è attraversato da una corrente la cui intensità è mezza unità.)

Adesso con gli altri elastici possiamo creare tutte le unità di intensità di corrente che vogliamo. Vale a

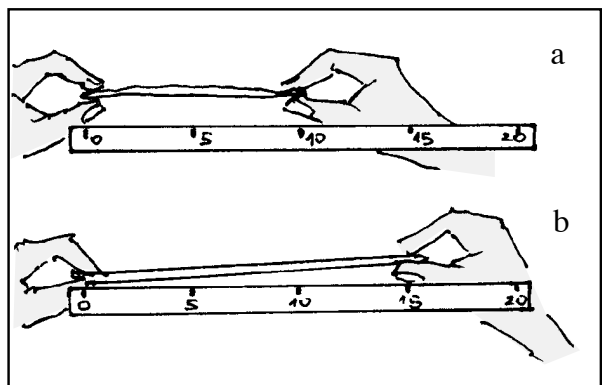


Fig. 3.51. Per la determinazione della corrente di quantità di moto unitaria. (a) L'elastico non è teso. (b) L'elastico è stato allungato di 5 cm.

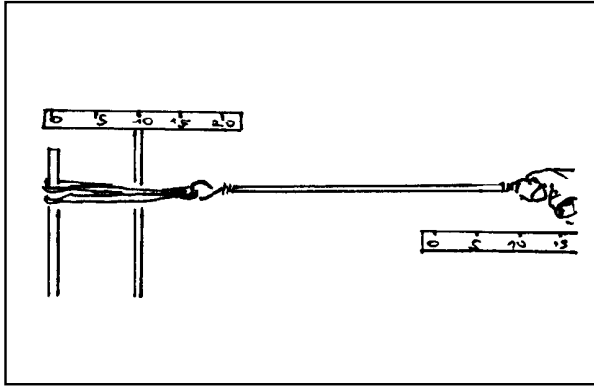


Fig. 3.52. La corda dell'estensore viene tarata con l'aiuto degli elastici.

dire che possiamo generare dei multipli della nostra corrente di intensità unitaria. Ad esempio: aggan- ciando tre elastici unitari l'uno accanto all'altro, complessivamente i tre elastici saranno attraversati da una corrente di tre unità.

Grazie alla nostra scorta di elastici possiamo anche *tarare* altri oggetti elastici, per esempio un estensore, fig. 3.52. Per farlo facciamo fluire attraverso l'estensore una, due, tre ecc. unità di intensità di corrente e misuriamo di volta in volta la variazione della sua lunghezza rispetto alla lunghezza a riposo.

La fig. 3.53 mostra l'intensità di corrente rispetto all'"allungamento". Questa curva rappresenta la *curva di taratura* dell'estensore. Adesso, quando vogliamo misurare un'intensità di corrente di quantità di moto, possiamo fare a meno del procedimento laborioso con gli elastici e utilizzare invece l'estensore.

Si debba ad esempio misurare l'intensità della corrente che fluisce in un carrello che stiamo tirando. Basterebbe tirarlo con l'estensore e misurare di quanto si allunga. Se l'allungamento dovesse essere di 0,25 m, allora potremmo dedurre dalla curva di taratura che la corrente di quantità di moto ha un'intensità di 4 N.

Vogliamo ora determinare la relazione tra allungamento e intensità della corrente di quantità di moto

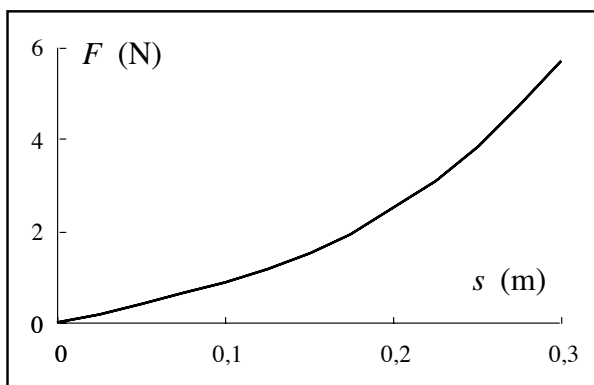


Fig. 3.53. Curva di taratura dell'estensore: intensità della corrente di quantità di moto in funzione dell'allungamento.

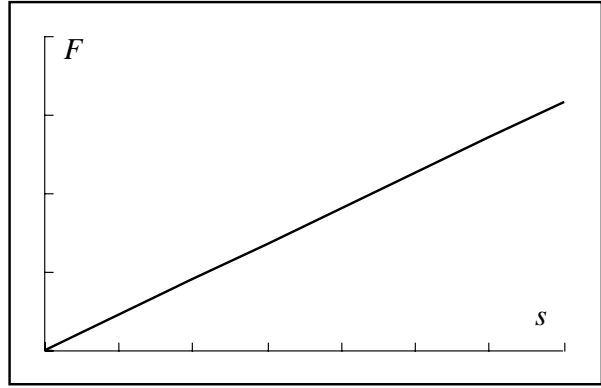


Fig. 3.54. In una molla d'acciaio c'è proporzionalità diretta tra l'intensità della corrente di quantità di moto e l'allungamento.

in un altro oggetto: una molla d'acciaio. La fig. 3.54 mostra il risultato. La relazione è ancora più semplice rispetto al caso dell'estensore: è lineare. Allungamento s e intensità della corrente di quantità di moto F , sono direttamente proporzionali. Si dice anche che la molla segue la *legge di Hooke*. Sotto forma di formula, la legge di Hooke ha questo aspetto:

$$F = k \cdot s.$$

Per una determinata molla, k è solo una costante. k viene detta *costante della molla*. La sua unità di misura è il N/m. In generale per molle diverse la costante della molla ha valori diversi. La fig. 3.55 mostra la relazione tra F e s per due molle diverse. Il valore di k è maggiore per la molla A rispetto alla molla B. Se tendiamo sia la molla A che la molla B con lo stesso allungamento, la corrente di quantità di moto nella molla A è maggiore che nella molla B. Una corrente di quantità di moto più forte, significa quindi una trazione più grande. Di conseguenza la molla con la più grande costante è anche la molla più rigida.

Oltre che con la trazione, molte molle si possono sollecitare anche con la compressione. Per queste molle la legge di Hooke, cioè la proporzionalità diretta tra variazione di lunghezza e intensità della corrente, vale sia per l'allungamento (valori positivi di s) che per l'accorciamento (valori negativi di s).

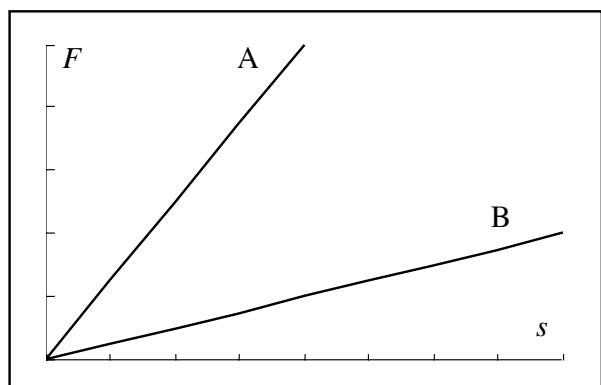


Fig. 3.55. La costante della molla A è più grande di quella della molla B. La molla A è più dura della B.

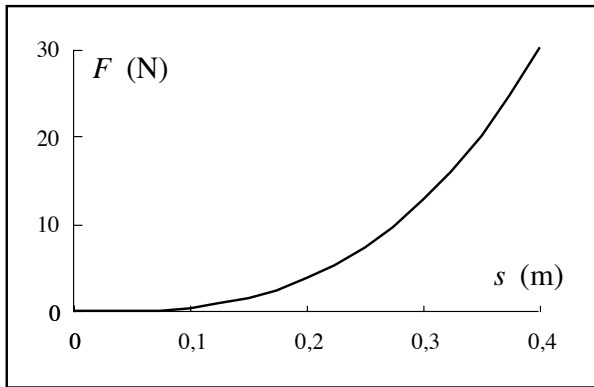


Fig. 3.56. Per l'esercizio 2

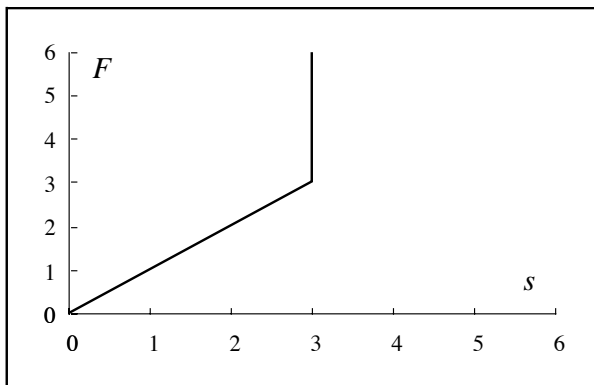


Fig. 3.57. Per l'esercizio 3

Esercizi

- Una molla ha la costante $k = 150 \text{ N/m}$. Di quanto si allunga se viene attraversata da una corrente di quantità di moto di
 - 12 N
 - 24 N
- La fig. 3.56 rappresenta la relazione $F-s$ misurata per una determinata corda elastica.
 - Di quanto si allunga la corda se attraversata da una corrente di quantità di moto di 15 N? Di quanto si allunga con una corrente di intensità 30 N?
 - Che intensità ha la corrente di quantità di moto se la corda si allunga di 20 cm?
 - Cosa percepiamo se allunghiamo la corda con le mani? Confronta con una molla.
- Come si potrebbe costruire un congegno che abbia una relazione $F-s$ come quella in fig. 3.57?
- Due molle vengono agganciate l'una all'altra e inserite in una corda attraversata da una corrente di quantità di moto. Una molla si allunga quattro volte più dell'altra. Che rapporto c'è tra le costanti delle due molle?

3.13 Le correnti di quantità di moto possono distruggere

Se una corrente di quantità di moto diventa troppo intensa, il conduttore attraverso il quale fluisce si può rompere, fig. 3.58. Spesso si vuole evitare che succeda. A volte però si vuole strappare, rompere o frantumare qualcosa di proposito. Vogliamo discutere degli esempi per entrambi i casi.

Il traino di un'auto

Il cavo di traino si è rotto al momento di mettersi in moto, fig. 3.58. Come si sarebbe potuto evitare? Prova a portare fino a una certa velocità un veicolo pesante tirandolo con un filo sottile. Se tiri molto forte, cioè se lasci fluire una corrente di quantità di moto molto forte, il filo si strappa. È comunque possibile caricare il veicolo con la quantità di moto voluta. Si deve far fluire una corrente di quantità di moto sufficientemente debole ma che in compenso scorra per molto tempo. In altre parole: si deve tirare meno forte ma più a lungo. Per il traino di un'auto questo significa: si deve partire con precauzione in modo che l'intensità della corrente di quantità di moto non diventi troppo forte.

Afferrare un sasso

Un sasso che colpisce una finestra cede al vetro la sua quantità di moto in un breve lasso di tempo. L'intensità della corrente è quindi molto alta. La conseguenza: il vetro si rompe. Per contro, se prendiamo il sasso con la mano durante la frenata ne assecondiamo per un po' il movimento. Così facendo, l'intervallo di tempo durante il quale dal sasso defluisce quantità di moto si allunga e l'intensità della corrente di quantità di moto diminuisce. Non ci sono danni.

Il martello

Può capitare di voler distruggere qualcosa di proposito, come un mattone. Per farlo si può usare un martello. In un primo tempo il martello viene caricato lentamente di quantità di moto mentre lo abbassiamo. Quando poi colpisce il mattone, la quantità di moto defluisce in breve tempo. L'intensità della corrente di quantità di moto è molto alta e il mattone si rompe.

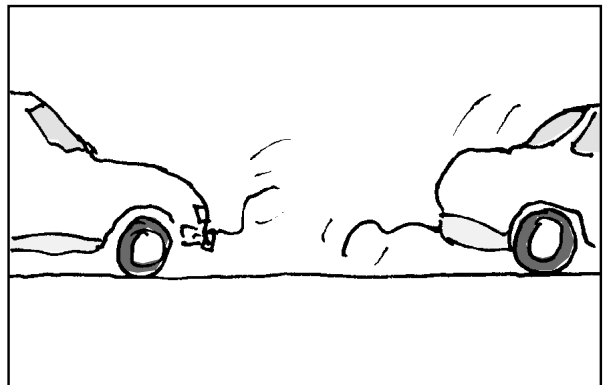


Fig. 3.58. Se la corrente di quantità di moto è troppo grande, il conduttore si può rompere.

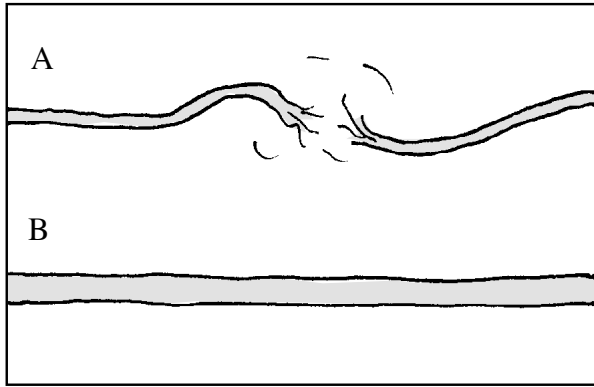


Fig. 3.59. La sezione della corda B è doppia di quella della corda A.

La capacità o meno di una corrente di quantità di moto di distruggere qualcosa non dipende solo dalla sua intensità. È ovvio che la rottura del cavo di traino in fig. 3.58 si poteva evitare in altro modo: prendendo una corda più spessa. Se ne può dedurre: ai fini della rottura non è importante solamente la corrente di quantità di moto più forte, quanto piuttosto la corrente forte che fluisce attraverso una sezione ridotta. La corda A in fig. 3.59, quando è attraversata da una corrente di 50 N si rompe; la corda B, che ha una sezione doppia, non si rompe. Questo è facile da capire. Se la corda A ha una sezione di 1 cm^2 e la corda B di 2 cm^2 , possiamo facilmente immaginarci la corda B come due corde parallele di 1 cm^2 di sezione, attraversate ognuna da una corrente di 25 N, cioè meno sollecitate. Quindi è possibile ridurre il carico del materiale di un conduttore rendendolo più spesso. Anche a questo proposito alcuni esempi.

Chiodi, puntine da disegno, coltelli, scalpelli

Questi sono oggetti con cui si può distruggere qualcosa. (Fare un buco nel muro è una forma di distruzione.) In tutti i casi una corrente di quantità di moto viene condotta nel materiale da lavorare attraverso una punta o un'altra strozzatura. Nel punto di contatto, il materiale è sottoposto a un carico così grande da rompersi.

Cintura di sicurezza e airbag

In un incidente un'automobile si ferma molto rapidamente. Cede la sua quantità di moto molto in fretta: a un albero, a un guardrail o a un altro veicolo. Anche i passeggeri hanno quantità di moto di cui disfarsi durante l'incidente. Le forti correnti di quantità di moto che fluiscono in quei momenti,

causano la distruzione dell'auto e il ferimento dei passeggeri. Per ridurre almeno in parte le correnti di quantità di moto, le auto sono provviste della cosiddetta zona ad assorbimento d'urto. Durante lo scontro l'automobile si accartoccia un po'. In questo modo il processo di trasmissione della quantità di moto viene leggermente dilatato nel tempo e le correnti di quantità di moto diventano un po' più deboli.

Le cinture di sicurezza hanno svariate funzioni.

Primo: in un incidente si allungano leggermente. In questo modo la trasmissione di quantità di moto dai passeggeri al veicolo viene leggermente estesa nel tempo e l'intensità della corrente si riduce.

Secondo: la corrente di quantità di moto che defluisce dal passeggero viene ripartita su una superficie piuttosto grande, visto che le cinture sono abbastanza larghe. In questo modo, come abbiamo visto, viene ridotto l'effetto distruttivo delle correnti di quantità di moto. Senza cintura i passeggeri potrebbero anche finire addosso a qualche parte appuntita dell'abitacolo.

Infine, grazie alla cintura le correnti di quantità di moto vengono dirette su parti del corpo dove il pericolo di ferimento non è molto alto. Sarebbe molto peggio se il passeggero cedesse la sua quantità di moto attraverso la testa.

In questa situazione l'airbag è ancora più efficace: la superficie attraverso la quale la quantità di moto defluisce dai passeggeri è ancora più grande.

Esercizio

Un'auto deve trainare un'altra. Si può prevedere una corrente di quantità di moto di 2000 N. Purtroppo gli automobilisti non hanno una corda da traino. Alla fine trovano un rotolo di spago. Quest'ultimo però sopporta una corrente di quantità di moto di soli 100 N. Cosa proponi?

3.14 La velocità

La grandezza fisica che ci dice quanto in fretta si sta muovendo un veicolo o un altro oggetto, si chiama *velocità*, abbreviata v .

Un automobilista deve sempre sapere quanto in fretta sta viaggiando, deve conoscere la velocità della sua auto. A questo scopo ogni auto è provvista

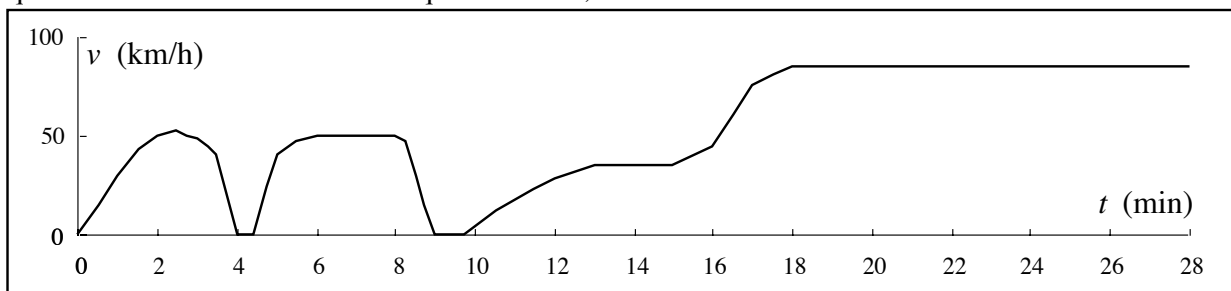


Fig. 3.60. Tracciato del tachigrafo di un autocarro: la velocità è riportata in funzione del tempo.

di un misuratore di velocità: il *tachimetro*. Indica la velocità nell'unità di misura chilometri orari, abbreviata in km/h.

La fig. 3.60 mostra il tracciato di un tachigrafo: la velocità di un autocarro è stata riportata automaticamente rispetto al tempo. Cerchiamo di spiegare il diagramma. L'autocarro è partito all'istante $t = 0$ minuti. Dopo 4 minuti si è dovuto fermare un attimo e ancora dopo 9 minuti. Probabilmente alcuni semafori erano sul rosso. Dal 12° al 16° minuto ha viaggiato abbastanza lentamente, circa 35 km/h. Forse era in salita o forse il traffico era intenso. Dal 18° minuto in avanti è andato a una velocità alta e costante, a 85 km/h. Evidentemente era uscito dalla città.

Fintanto che un corpo si muove a velocità costante, esiste una semplice relazione tra la sua velocità, il tratto percorso e il tempo impiegato per percorrere quel tratto.

Se un'auto che viaggia a velocità costante impiega mezz'ora per percorrere 60 km, impiegherà 0,75 ore per 90 km, 1 ora per 120 km, 2 ore per 240 km e così via, vedi tabella. 3.5. Il tratto percorso s è quindi proporzionale al tempo t :

$$s \sim t$$

In fig. 3.61 questa relazione è rappresentata graficamente. Questa constatazione può essere espressa in altro modo: il quoziente s/t è costante. In effetti

$$\frac{60 \text{ km}}{0,5 \text{ h}} = \frac{90 \text{ km}}{0,75 \text{ h}} = \frac{120 \text{ km}}{1 \text{ h}} = \frac{240 \text{ km}}{2 \text{ h}} = \dots$$

e questo quoziente equivale alla velocità $v = 120$ km/h. Di conseguenza quando la velocità è costante possiamo scrivere:

$$v = \frac{s}{t}$$

Come altre grandezze, anche la velocità ha diverse unità di misura. La velocità delle automobili si dà in km/h, quella delle navi in nodi. Secondo una convenzione internazionale l'unità di misura utilizzata in fisica è il metro al secondo, abbreviata in m/s.

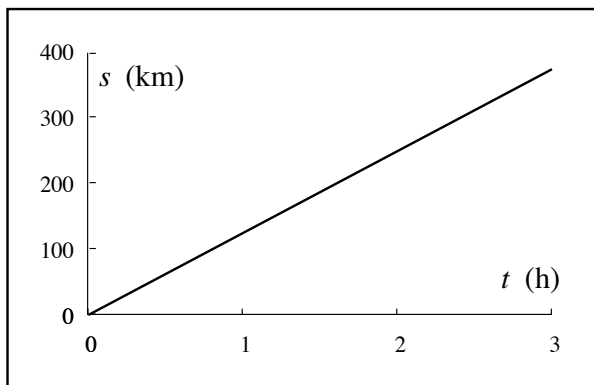


Fig. 3.61. Relazione tra spazio percorso e tempo impiegato, per un'automobile

Trasformiamo l'unità km/h in m/s:

$$1 \frac{\text{km}}{\text{h}} = \frac{1 \text{ km}}{1 \text{ h}} = \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}} = 0,2778 \text{ m/s}$$

Tabella 3.5. Spazio percorso, tempo necessario per percorrerlo e quoziente tra spazio e tempo per un veicolo che viaggia a velocità costante.

s in km	t in h	s/t in km/h
60	0,5	120
90	0,75	120
120	1	120
180	1,5	120
240	2	120

Esercizi

1. Un ciclista impiega 40 minuti per percorrere 10 km. A che velocità (in km/h) viaggia?
2. Un treno viaggia per 1 h 32 min a velocità costante percorrendo in questo tempo 185 km. Qual è la sua velocità? Dai il risultato in km/h e in m/s.
3. Un'auto procede per 10 minuti a 90 km/h. Durante questo tempo, quanti km percorre?
4. Un aereo che vola a 800 km/h percorre 1600 km. Quanto dura il volo?
5. La velocità della luce è 300 000 km/s, la distanza tra il Sole e la Terra 150 000 000 km. Quanto tempo impiega la luce del Sole per arrivare sulla Terra?

3.15 La relazione tra quantità di moto, massa e velocità

Già sappiamo: più veloce e più pesante un oggetto, maggiore la sua quantità di moto. Questa frase è un'affermazione sulla relazione tra tre grandezze fisiche: la quantità di moto p , la massa m e la velocità v . Ora vogliamo esaminare l'aspetto esatto di questa relazione: cerchiamo una relazione "quantitativa".

Ci chiediamo in che modo la quantità di moto dipenda dalle altre due grandezze. È molto più facile rispondere se scomponiamo il problema in due parti: prima esaminiamo la relazione tra la quantità di moto e la massa dell'oggetto considerato, poi la dipendenza dalla velocità.

Per fare in modo che la quantità di moto sia influenzata solo dalla massa, consideriamo diversi oggetti di massa diversa che si muovono alla stessa velocità. Il problema acquista in chiarezza se scegliamo i corpi come mostrato in fig. 3.62. Il corpo A è una slitta su una rotaia a cuscino d'aria. Il corpo B è composto da due slitte entrambi pesanti come il corpo A. La massa di B è quindi doppia rispetto alla massa di A:

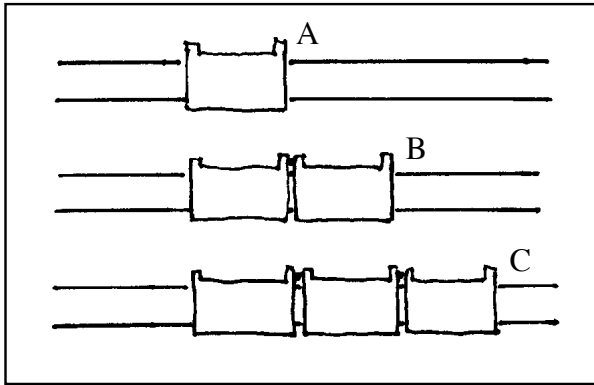


Fig. 3.62. Il corpo B ha una massa doppia, il corpo C tripla rispetto al corpo A. Inoltre il corpo B ha il doppio e il corpo C il triplo di quantità di moto.

$$m_B = 2 \cdot m_A$$

Il corpo C è composto da tre di queste slitte, ha quindi una massa tripla rispetto ad A:

$$m_C = 3 \cdot m_A$$

Possiamo immaginare dei corpi che abbiano il quadruplo, quintuplo... della massa. Tutti i corpi A, B, C, ecc. devono muoversi alla stessa velocità. Che rapporto c'è tra le quantità di moto? Il corpo B non è altro che due esemplari del corpo A agganciati. Se A ha una quantità di moto p_A , allora B deve avere una quantità di moto p_B che è doppia:

$$p_B = 2 \cdot p_A$$

Visto che C consiste di tre esemplari del corpo A e che ognuno di loro è veloce come gli altri, C deve avere una quantità di moto tripla rispetto ad A:

$$p_C = 3 \cdot p_A$$

Notiamo quindi che la relazione è: la quantità di moto di due corpi si differenzia dello stesso fattore delle masse corrispondenti a condizione che le velocità siano uguali. In altre parole: quantità di moto e massa sono direttamente proporzionali:

$$p \sim m \quad \text{per } v = \text{costante}$$

Questa è la prima delle relazioni cercate. La seconda, cioè quella tra quantità di moto e velocità, è più laboriosa da ricavare.

L'idea che seguiremo è: riduciamo a metà la quantità di moto di un corpo e vediamo come cambia la sua velocità. Poi la riduciamo a un terzo e osserviamo di nuovo come cambia v e così via. Nel dettaglio l'esperimento ha l'aspetto mostrato in fig. 3.63.

Il corpo A si muove verso il corpo B, fermo. A urta B e vi resta agganciato così che A e B continuano assieme verso destra. Misuriamo la velocità di A prima e dopo l'urto. (Dopo l'urto è naturalmente uguale a quella di B). Poi esaminiamo i valori di quantità di moto del corpo A prima e dopo l'urto.

Chiamiamo p_p la quantità di moto che ha prima dell'urto e p_d quella che ha dopo. Visto che durante

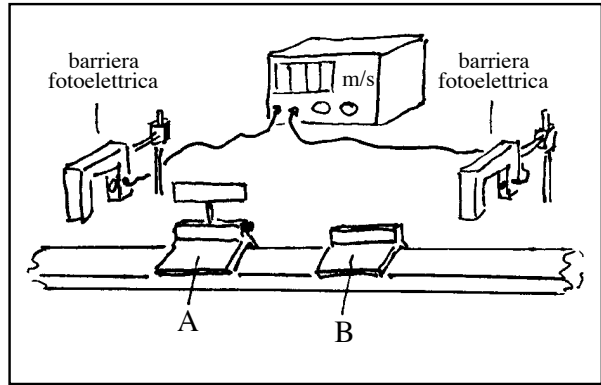


Fig. 3.63. Durante l'urto la quantità di moto del corpo A si dimezza. La misurazione rivela che anche la velocità è dimezzata.

l'urto p_p si distribuisce equamente su A e B, dopo l'urto A ha esattamente la metà della quantità di moto che aveva prima. Quindi:

$$p_d = (1/2) \cdot p_p$$

La velocità viene misurata prima e dopo l'urto. Risulta che la velocità dopo l'urto v_d è esattamente la metà della velocità prima dell'urto v_p :

$$v_d = (1/2) \cdot v_p$$

Se facciamo urtare A contro due corpi fermi B e C, fig. 3.64, allora la quantità di moto si distribuisce su tre corpi e

$$p_d = (1/3) \cdot p_p$$

In questo caso la misurazione della velocità dà:

$$v_d = (1/3) \cdot v_p$$

Concludiamo che per un certo corpo (cioè per una massa che resta costante) la quantità di moto e la velocità sono direttamente proporzionali:

$$p \sim v \quad \text{per } m = \text{costante}$$

Abbiamo quindi trovato separatamente le due relazioni cercate: quella tra p e m e quella tra p e v . Le scriviamo una sotto l'altra:

$$p \sim m \quad \text{per } v = \text{costante} \quad (1)$$

$$p \sim v \quad \text{per } m = \text{costante} \quad (2)$$

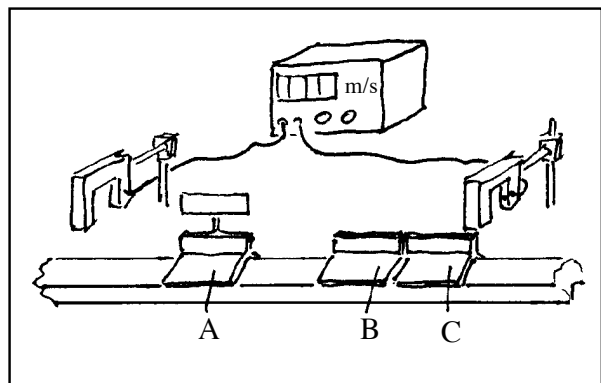


Fig. 3.64. Durante l'urto sia la quantità di moto che le velocità del corpo A si riducono a un terzo del valore iniziale.

La matematica ci dice che queste due relazioni possono essere riassunte in una sola:

$$p \sim m \cdot v \quad (3)$$

Si capisce che questa proporzionalità è corretta dal fatto che le relazioni (1) e (2) ne sono una conseguenza. Se lasciamo v costante, dalla relazione (3) si ottiene la (1). Se invece in (3) lasciamo m costante, allora otteniamo la relazione (2).

Dalla (3) non possiamo però ancora calcolare la quantità di moto di un corpo conoscendone massa e velocità. Si deve ancora introdurre nella (3) un coefficiente di proporzionalità. Però siamo fortunati: non abbiamo bisogno di un coefficiente di proporzionalità perché l'unità di misura della quantità di moto (huygens) è definita in modo tale che, se la massa è data in kg e la velocità in m/s, quel coefficiente è uguale a uno. Quindi:

$$p = m \cdot v$$

Questo è il risultato cercato. Abbiamo a disposizione una formula molto utile con la quale calcolare la quantità di moto di un corpo di cui conosciamo massa e velocità. La massa e la velocità sono però facili da misurare. Quindi abbiamo ottenuto un metodo semplice per la determinazione dei valori di quantità di moto. Tieni presente che con questa formula, la quantità di moto risulta nell'unità di misura huygens solamente se la massa è data in kg e la velocità in m/s.

La quantità di moto di un corpo è direttamente proporzionale alla massa e alla velocità del corpo.

Studiamo ancora l'equazione $p = m \cdot v$ ma da un altro punto di vista. Immaginati due corpi A e B dalla massa molto diversa. Siano

$$m_A = 1 \text{ kg}$$

e

$$m_B = 1000 \text{ kg.}$$

A entrambi i corpi viene fornita una quantità di moto di 1 Hy. Come reagiscono i corpi? Naturalmente entrambi cominciano a muoversi, ma lo fanno in maniera molto diversa. Da

$$p = m \cdot v$$

segue

$$v = \frac{p}{m}$$

Per il corpo A si ottiene quindi una velocità di

$$v_A = \frac{p}{m_A} = \frac{1 \text{ Hy}}{1 \text{ kg}} = 1 \text{ m/s}$$

e per il corpo B

$$v_B = \frac{p}{m_B} = \frac{1 \text{ Hy}}{1000 \text{ kg}} = 0,001 \text{ m/s}$$

Quindi A è 1000 volte più veloce di B. È più facile muovere un corpo di piccola massa piuttosto che un corpo di grande massa. Più in generale si può dire che:

È più facile modificare la velocità di un corpo di piccola massa che quella di un corpo di grande massa.

Si dice anche che i corpi pesanti hanno un'inerzia maggiore di quelli leggeri.

La massa di un corpo è responsabile della sua inerzia.

Esercizi

1. Un autocarro di 12 t (= 12 000 kg) viaggia a una velocità di 90 km/h. Che quantità di moto ha?
2. Un portiere para un tiro che arriva a una velocità di 20 m/s. Che quantità di moto defluisce a terra dal portiere? (Il pallone pesa 420 g.)
3. Una pallina da tennis viene lanciata perpendicolarmente contro un muro a una velocità di 30 m/s. Che quantità di moto fluisce nel muro? (La pallina da tennis pesa 50 g.)
4. Una persona accelera un carrello privo di attrito. Un dinamometro indica la corrente di quantità di moto che fluisce nel carrello. La persona tira per 5 secondi. Qual è la velocità finale? (Il carrello pesa 150 kg, il dinamometro segna 15 N.)
5. Un treno parte tirato da una locomotiva. Nel gancio che collega la locomotiva ai vagoni fluisce una corrente di quantità di moto di 200 kN. Qual è la quantità di moto del treno (senza locomotiva) dopo 30 secondi? A quel punto il treno ha una velocità di 54 km/h. Quanto pesa il treno?
6. Un carrello di 42 kg, inizialmente fermo, viene accelerato da una corrente di quantità di moto di 20 N. Che quantità di moto è fluita nel carrello in 3 secondi? A quel punto la sua velocità è di 1,2 m/s. Qual è la sua quantità di moto? Dov'è finita la quantità di moto mancante?
7. In un tubo rettilineo lungo 2 km e dal diametro di 10 cm scorre acqua a una velocità di 0,5 m/s. Con una valvola posta all'estremità del tubo, l'acqua viene bloccata. Calcola la quantità di moto ceduta dall'acqua. Dove va a finire la quantità di moto? L'uscita resta bloccata per 2 secondi. Quanto vale la forza dell'acqua sulla valvola (l'intensità della corrente di quantità di moto)? Suggerimento: calcola dapprima il volume dell'acqua in litri. 1 l d'acqua ha una massa di 1 kg.

Tabella 3.6. Nome, unità SI e loro abbreviazioni per alcune grandezze fisiche

Nome (simbolo)	Unità SI (simbolo)
pressione (p)	pascal (Pa)
energia (E)	joule (J)
intensità della corrente di energia (P)	watt (W)
tempo (t)	secondo (s)
quantità di moto (p)	huygens (Hy)
intensità della corrente di quantità di moto, forza (F)	newton (N)
velocità (v)	metri al secondo (m/s)
spazio percorso (s)	metro (m)
massa (m)	chilogrammo (kg)

3.16 Unità SI

In ciò che finora hai potuto conoscere della fisica si è dimostrato vero quanto affermato all'inizio della meccanica: per dare una descrizione fisica del mondo ci vogliono le grandezze fisiche. Un obiettivo importante della fisica, se non addirittura il più importante, è trovare delle relazioni tra queste grandezze.

Vogliamo ricordare alcune delle grandezze incontrate finora, tabella 3.6.

Sai già che per ogni grandezza c'è un'unità di misura. Per la maggior parte delle grandezze ce n'è però più di una, tabella 3.7. Il fatto che per una stessa grandezza esistano diverse unità di misura ha svariate cause. Spesso, in ambiti scientifici, tecnici o professionali diversi, sono state definite unità di misura differenti: i sarti usano il braccio, gli idraulici il pollice e i fisici il metro. A volte ci si è accordati per una stessa unità di misura, ma in paesi diversi per unità diverse. Così nella maggior parte dei paesi europei la massa si misurava in grammi, mentre negli USA si misurava in libbre. Alla fine però ci si è accordati e si è stabilito un sistema vincolante di unità di misura internazionali, il *Système International*, in conformità con il quale ogni grandezza ha una sola unità di misura (con poche eccezioni). Queste unità sono dette *unità SI*.

Tabella 3.7. La maggior parte della grandezze ha altre unità di misura oltre all'unità SI.

Nome della grandezza	Unità SI
pressione	pascal, bar, atmosfera
energia	joule, caloria
intensità della corrente di energia	watt, cavallo vapore (CV)
tempo (t)	secondo, minuto, ...anno
intensità della corrente di quantità di moto, forza	newton, dina
velocità (v)	metri al secondo, nodi, chilometri orari
spazio percorso (s)	metro, pollice, anno luce
massa (m)	chilogrammo, libbra

L'uso delle unità SI non ha solo il vantaggio di facilitare la comprensione internazionale. Il sistema è infatti strutturato in modo da semplificare il più possibile le formule fisiche. Se nelle formule che hai conosciuto inserisci a destra dell'uguale i valori delle grandezze in unità SI, allora anche il risultato, cioè il valore della grandezza a sinistra, si ottiene in unità SI. Se per contro inserissimo a destra dei valori in altre unità il risultato potrebbe risultare in un'unità di misura completamente inutilizzabile. Vogliamo considerare due esempi.

L'equazione $P = E/t$ permette di calcolare l'intensità della corrente di energia a partire da energia e tempo. Se diamo l'energia in joule e il tempo in secondi, l'intensità della corrente di energia risulta in joule al secondo. Però 1 J/s è esattamente 1 watt. Otteniamo quindi il risultato nell'unità SI watt. Avessimo dato l'energia in calorie e il tempo in minuti avremmo ottenuto un risultato in calorie al minuto, quindi in un'unità di misura assolutamente inutilizzata.

Da queste considerazioni vogliamo trarre il seguente insegnamento:

Quando vuoi risolvere un esercizio e i dati non sono in unità SI, per prima cosa trasformali in unità SI.

4. Il campo gravitazionale

4.1 Il moto verticale

Nei seguenti paragrafi ci occuperemo dei concetti di attrazione terrestre e forza di gravità e degli oggetti che cadono per terra. Mentre finora abbiamo considerato solo dei moti in orizzontale, ora tratteremo quelli in direzione verticale. Possiamo comunque applicare anche ai moti verticali tutto quello che abbiamo imparato su quelli orizzontali. Dobbiamo solamente ruotare l'asse delle x di 90° . L'asse x viene ruotato in modo che la parte positiva punti verso il basso. Questo significa:

La quantità di moto di un corpo è positiva se il corpo si muove verso il basso, negativa se il corpo si muove verso l'alto.

Nel paragrafo 3.8 avevamo trovato le seguenti regole:

Corrente di quantità di moto verso destra: compressione

Corrente di quantità di moto verso sinistra: trazione

Visto che ciò che prima era a destra ora è in basso e ciò che prima era a sinistra ora è in alto, la nuova regola dice:

Corrente di quantità di moto verso il basso: compressione

Corrente di quantità di moto verso l'alto: trazione

Prendiamo come esempio il circuito chiuso di corrente di quantità di moto in fig. 4.1.

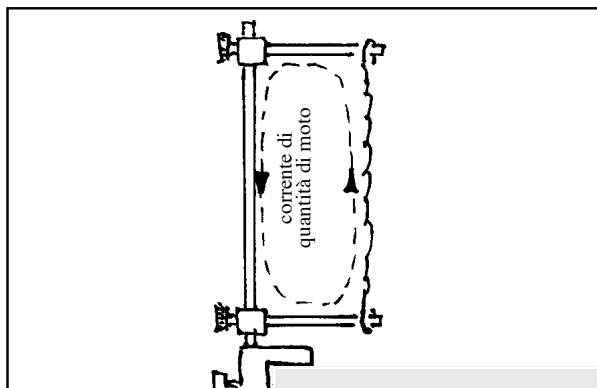


Fig. 4.1. Circuito chiuso di quantità di moto con l'asse x in direzione verticale.

4.2 L'attrazione terrestre - il campo gravitazionale

Tutti gli oggetti sono attratti dalla Terra. Lo deduciamo da due fenomeni:

1. Prendiamo in mano un oggetto e lo lasciamo andare: cade verso il basso.
2. Ogni oggetto ha un peso.

Entrambi i fenomeni mostrano che l'oggetto riceve quantità di moto dalla Terra. Un oggetto che cade, durante la caduta diventa sempre più veloce. La sua quantità di moto aumenta.

Anche un corpo che non cade riceve quantità di moto, come ci si rende conto appendendolo a un dinamometro come in fig. 4.2. Il dinamometro indica che dal corpo una corrente di quantità di moto fluisce costantemente verso l'alto, attraverso il supporto e a terra. Questa quantità di moto deve essere continuamente sostituita. Quindi, nel corpo fluisce ininterrottamente quantità di moto, ma attraverso un collegamento tra il corpo e la Terra che non si può vedere.

Abbiamo già visto un simile collegamento conduttore di quantità di moto, un collegamento che non si può vedere: il campo magnetico. Nel nostro caso non si può trattare di un campo magnetico, altrimenti solo le calamite e gli oggetti di ferro potrebbero essere attirati dalla Terra. Il collegamento consiste quindi in una struttura che non è il campo magnetico ma che con il campo magnetico è imparentata. Viene chiamato *campo gravitazionale*. Esattamente come un polo magnetico è circondato da un campo magnetico, così ogni struttura dotata di massa, cioè ogni corpo, è circondata da un campo gravitazionale. Più grande è la massa del corpo, più denso è questo campo.

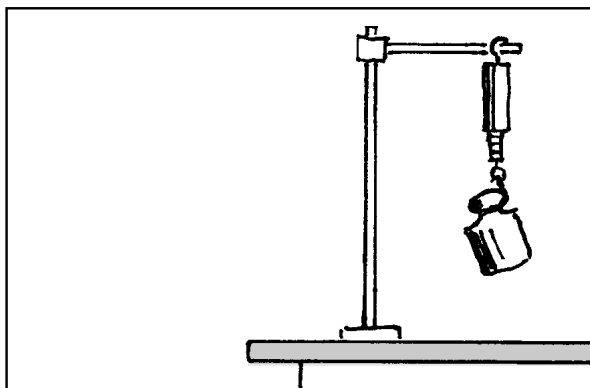


Fig. 4.2. La quantità di moto che defluisce costantemente a terra attraverso il dinamometro e il corpo, torna al corpo attraverso un collegamento invisibile.

Ogni corpo è circondato da un campo gravitazionale. Più la massa del corpo è grande, più il campo è denso. Attraverso il campo gravitazionale la quantità di moto fluisce da un corpo all'altro. L'attrazione terrestre è causata da una corrente di quantità di moto tra la Terra e il corpo considerato.

4.3 Da cosa dipende l'attrazione terrestre

Verifichiamolo. Appendiamo a un dinamometro prima un pezzo di ferro di massa 1 kg, poi un pezzo di legno di 1 kg. Il dinamometro segna la stessa cosa in entrambi i casi. È una sorpresa? Naturalmente no. D'altra parte come stabiliamo che un pezzo di ferro o di legno ha una massa di 1 kg? Mettendolo su una bilancia. Ma la maggior parte delle bilance funziona esattamente come il nostro dinamometro. Quindi usiamo la bilancia o il dinamometro per definire cosa si intende con due masse uguali: se due corpi causano la stessa variazione di lunghezza in un dinamometro, allora hanno la stessa massa.

Possiamo anche formularlo diversamente: se in due corpi fluiscono dalla Terra due correnti di quantità di moto della stessa intensità, hanno la stessa massa.

Prendiamo ora due corpi con una massa di 1 kg ciascuno. Possiamo unirli per ottenere un unico corpo di massa 2 kg. Ora nei due corpi assieme, fluisce una corrente di quantità di moto di intensità doppia di quella che fluisce in un singolo corpo. Probabilmente ti sembrerà ovvio. Però poteva anche sembrare ragionevole che l'aggiunta di un secondo corpo influenzasse la corrente di quantità di moto che fluisce nel primo.

Quanto è forte la corrente di quantità di moto che scorre in un corpo di 1 kg? Leggiamo dal dinamometro che ha un'intensità di circa 10 N. Una misurazione più precisa dà un valore di 9,81 N. In un corpo con una massa di 2 kg, fluiranno di conseguenza $2 \cdot 9,81 = 19,62$ N e in corpo di 10 kg 98,1 N. Abbiamo ancora a che fare con una proporzionalità: l'intensità della corrente di quantità di moto che fluisce dalla Terra in un corpo è direttamente proporzionale alla massa del corpo:

$$F \sim m$$

Il coefficiente di proporzionalità ha un valore di 9,81 N/kg:

$$F = m \cdot 9,81 \text{ N/kg}$$

Il nostro ragionamento non è ancora completo. Un chilogrammo di ferro pesa effettivamente tanto quanto un chilogrammo di legno, ma un chilogrammo di ferro sulla Luna pesa meno che sulla Terra. Facciamo quindi - mentalmente - il seguente esperimento. Prendiamo un oggetto della massa di 1 kg e lo pesiamo in diversi luoghi: qui da noi, poi al Polo Nord, all'equatore, sulla Luna, su Marte, sulla

Tabella 4.1. Valore della costante locale in luoghi diversi.

Luogo	g in N/kg
centroeuropa	9.81
polo nord e polo sud	9.83
equatore	9.78
superficie della Luna	1.62
superficie di Marte	3.8
superficie del Sole	274
superficie di una stella di neutroni	1 000 000 000 000

superficie del Sole, su una stella di neutroni. I risultati delle pesate sono riassunti nella tabella 4.1.

In ogni luogo, vale la proporzionalità

$$F \sim m,$$

ma il coefficiente di proporzionalità cambia a dipendenza di dove ci si trova. Tra i vari punti della superficie terrestre i valori variano di poco, ma su altri corpi celesti si differenziano notevolmente dal valore sulla Terra. La relazione tra F e m viene scritta nella forma:

$$F = m \cdot g$$

Visto che il coefficiente di proporzionalità g dipende dal luogo dove si trova il corpo di massa m , viene detto *costante locale*.

L'intensità della corrente di quantità di moto che fluisce dalla Terra in un corpo, è uguale al prodotto tra la massa del corpo e la costante locale. Sulla superficie terrestre la costante locale vale 9,81 N/kg \approx 10 N/kg.

Torniamo ora alla descrizione dell'attrazione terrestre nel modello di forza: la grandezza F viene chiamata *forza di gravità* o *forza peso* e si dice che su un corpo agisce la forza di gravità.

Cosa intendiamo esattamente quando di un corpo diciamo che è molto pesante? Intendiamo dire che è difficile sollevarlo da terra. Ma allora intendiamo dire che ha una grande massa? Probabilmente no. Sulla Luna non sarebbe per niente difficile sollevare questo "pesante" oggetto dal suolo (lunare). Con "pesante" intendiamo piuttosto che nel corpo fluisce una forte corrente di quantità di moto, o in altre parole, che la forza peso che agisce sul corpo è grande. Lo stesso oggetto può quindi essere pesante o leggero, a dipendenza del luogo dove si trova.

Esercizi

1. Che corrente di quantità di moto fluisce dalla Terra nel tuo corpo? (Che forza peso agisce sul tuo corpo?) Che intensità avrebbe la corrente di quantità di moto sulla Luna, che intensità avrebbe su una stella di neutroni?

2. Durante una spedizione lunare, degli astronauti misurano con un dinamometro la forza peso su un corpo. Trovano $F = 300$ N. Che massa ha il corpo?

4.4 La caduta libera

Prendiamo in mano un oggetto e lasciamolo andare. Cade per terra. Adesso siamo in grado di spiegare il fenomeno: nell'oggetto fluisce una corrente di quantità di moto di intensità $m \cdot g$, quindi la sua quantità di moto aumenta costantemente. Più a lungo cade, più velocemente lo fa.

Però c'è un particolare curioso. Se lasciamo cadere nello stesso momento e dalla stessa altezza due oggetti, uno pesante e uno leggero, toccheranno terra contemporaneamente. Non dovrebbe arrivare prima il più pesante? Dopotutto riceve più quantità di moto dalla Terra.

Vogliamo calcolare quale legge segue la quantità di moto, mentre aumenta nei due corpi. Poniamo che la massa del corpo pesante sia 4 kg e quella del corpo leggero 1 kg. Sostituiamo

$$F = m \cdot g$$

in

$$p = F \cdot t$$

e otteniamo

$$p = m \cdot g \cdot t \quad (1)$$

Inserendo la massa e il valore della costante locale, per il corpo pesante otteniamo

$$p = 4 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg} \cdot t = 40 \text{ N} \cdot t$$

e per quello leggero

$$p = 1 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg} \cdot t = 10 \text{ N} \cdot t$$

Queste due relazioni tra p e t sono rappresentate in fig. 4.3. La figura evidenzia che la quantità di moto di ognuno dei due corpi aumenta regolarmente. La quantità di moto del corpo pesante aumenta però più rapidamente di quella del corpo più leggero. In ogni momento il corpo pesante ha quattro volte più quantità di moto di quello leggero.

Allora perché i corpi cadono alla stessa velocità? Per dare risposta a questa domanda, abbiamo bisogno della formula

$$p = m \cdot v \quad (2)$$

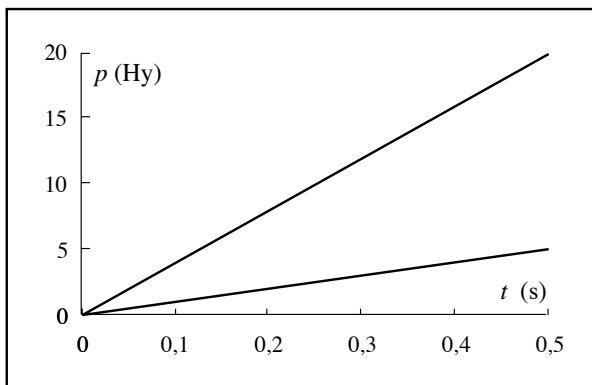


Fig. 4.3. Quantità di moto in funzione del tempo per due corpi di massa diversa che stanno cadendo.

Da cui segue in effetti: per portare il corpo pesante a una determinata velocità, ci vuole quattro volte più quantità di moto che per portare quello leggero alla stessa velocità. Il corpo con una massa più grande ha un'inerzia maggiore del corpo con la massa più piccola.

Otteniamo lo stesso risultato anche con un semplice calcolo. Uguagliamo i termini di destra di (1) e (2) e otteniamo

$$m \cdot g \cdot t = m \cdot v$$

La divisione di entrambi i termini per m , dà

$$v = g \cdot t \quad (3)$$

Questa equazione ci dice che la velocità di un corpo che cade aumenta regolarmente. Visto che la massa del corpo non appare nemmeno, ci dice pure che la velocità con la quale un corpo cade, non dipende dalla sua massa. In fig. 4.4 è riportata la velocità di un qualsiasi corpo che cade liberamente, in funzione del tempo.

Il fatto che nell'equazione (3) appaia la costante locale, significa che la velocità di caduta dipende dal luogo dove si trova il corpo che cade. Sulla Luna ad esempio, un corpo cade circa sei volte più lentamente che sulla Terra.

Il nostro ragionamento si basava sul presupposto che il corpo ricevesse quantità di moto unicamente dalla Terra e che non ne perdesse durante la caduta. Così facendo abbiamo semplificato la situazione effettiva: in realtà il corpo perde quantità di moto a causa dell'attrito con l'aria. Se un corpo non è troppo leggero e cade per un breve tratto, la nostra semplificazione è giustificata. Questo tipo di moto è detto *caduta libera*. Se il corpo è troppo leggero e oltre a ciò ha una grande superficie, i nostri ragionamenti non sono più validi.

Per i corpi in caduta libera vale:

Se un corpo A ha una massa doppia di un corpo B riceve anche il doppio di quantità di moto al secondo dalla Terra. Ha però bisogno anche del doppio di quantità di moto per raggiungere la stessa velocità di B.

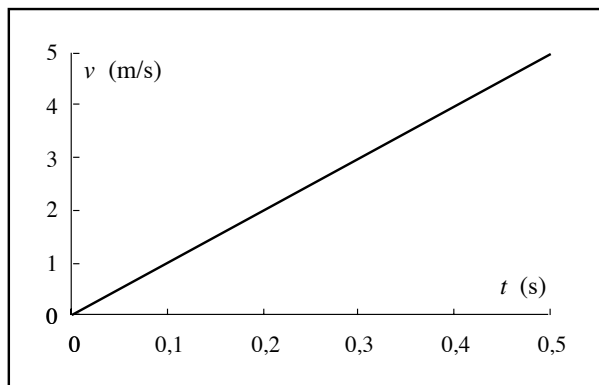


Fig. 4.4. La velocità di un corpo in caduta libera aumenta linearmente con il tempo.

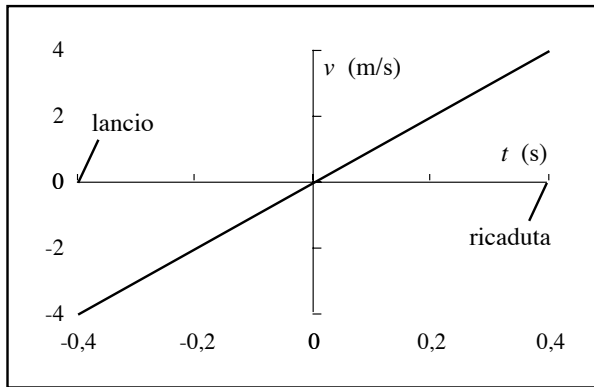


Fig. 4.5. La velocità di un corpo che è stato lanciato verso l'alto. Nella salita la velocità è negativa, nella discesa è positiva.

La velocità dei corpi in caduta aumenta regolarmente.

Tutti i corpi cadono con la stessa celerità.

Consideriamo ora un'altra variante della caduta libera: non lasciamo semplicemente cadere un oggetto fermo ma lo lanciamo in aria verticalmente. All'inizio avrà quindi quantità di moto negativa. Come prima, riceve costantemente quantità di moto positiva dalla Terra e di conseguenza la sua quantità di moto negativa diventa sempre più piccola: l'oggetto sale sempre più adagio, si ferma e infine comincia a muoversi nella direzione positiva (verso il basso).

La salita è un'immagine speculare della discesa. Nella caduta la quantità di moto del corpo aumenta regolarmente, nella salita la sua quantità di moto negativa diminuisce regolarmente. Lo stesso vale per la velocità: nella salita la velocità negativa diminuisce linearmente con il tempo, nella discesa la velocità (positiva) aumenta linearmente con il tempo.

La fig. 4.5 mostra la velocità in funzione del tempo. Come zero dell'asse del tempo abbiamo scelto l'istante dell'inversione di direzione. In questo conteggio il lancio avviene all'istante "meno 0,4 secondi". Dal diagramma notiamo che l'oggetto impiega lo stesso tempo sia per la salita che per la caduta.

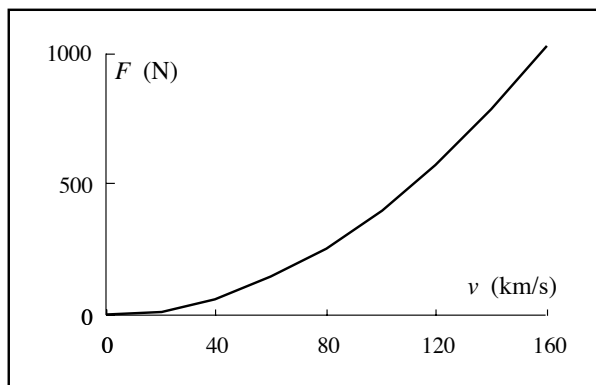


Fig. 4.6. Intensità della corrente di quantità di moto che defluisce nell'aria in funzione della velocità, per una comune utilitaria.

Esercizi

1. Ti tuffi dal trampolino di 3 m. La caduta libera dura 0,77 s. Qual è la tua quantità di moto al momento dell'impatto con la superficie dell'acqua? Qual è la tua velocità?
2. Quanto vale la velocità di un corpo dopo una caduta libera di 1/2 secondo sulla Terra, sulla Luna e sul Sole?
3. Un sasso viene lanciato verso l'alto. La sua velocità iniziale è 15 m/s. Dopo quanto tempo toccherà di nuovo terra?
4. Un sasso viene lanciato verso l'alto con una fionda. Dopo 5 s ricade a terra. Quanto era la sua velocità iniziale?

4.5 La caduta con attrito

Spesso la resistenza dell'aria non è per niente trascurabile. Il suo valore dipende:

1. dalla forma del corpo
2. dalla sua velocità.

Sicuramente sai già che è proprio così per le automobili:

1. si cerca di dare alla carrozzeria una forma che riduca al minimo la resistenza dell'aria.
2. quando si guida in fretta, l'attrito, e di conseguenza il consumo di benzina (al chilometro), è molto maggiore di quando si guida piano.

Le figg. 4.6 e 4.7 dimostrano che l'attrito, cioè l'intensità della corrente di quantità di moto che defluisce nell'aria, aumenta fortemente all'aumentare della velocità. In entrambi i diagrammi sono riportate le perdite di quantità di moto dovute all'attrito in funzione della velocità; in fig. 4.6 per una comune utilitaria, in fig. 4.7 per un oggetto molto più piccolo: una palla di 30 cm di diametro.

Avevamo visto: se non ci fossero perdite dovute all'attrito o fin quando queste sono trascurabili, tutti i corpi cadono allo stesso modo. Come si comporta però la velocità di caduta quando non si può più trascurare l'attrito?

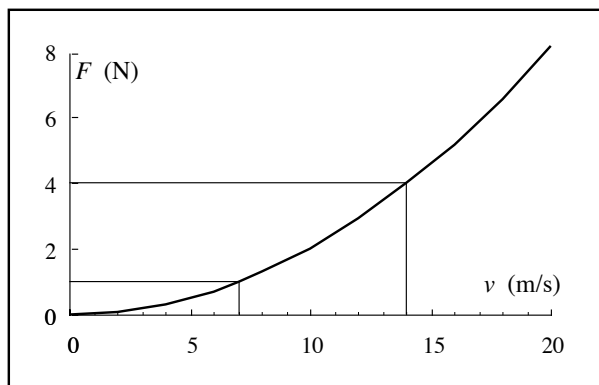


Fig. 4.7. Intensità della corrente di quantità di moto che defluisce nell'aria in funzione della velocità, per una palla di 30 cm di diametro .

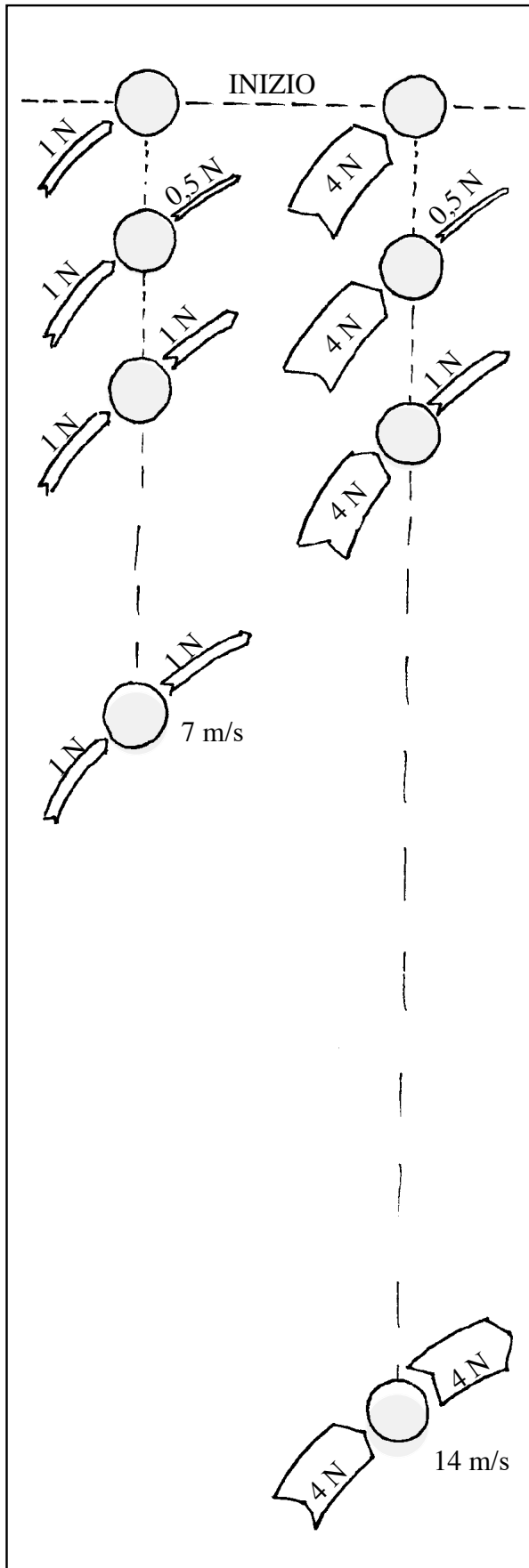


Fig. 4.8. Una palla leggera (sinistra) e una pesante (destra) cadono per terra. Quella leggera raggiunge la sua velocità limite prima di quella pesante.

Lasciamo cadere una palla grande ma molto leggera, fig. 4.8 parte sinistra. La sua massa sia

$$m = 100 \text{ g} = 0,1 \text{ kg} ,$$

il suo diametro $30 \text{ cm} = 0,3 \text{ m}$. Dalla Terra al corpo fluisce in permanenza una corrente di quantità di moto di

$$F = m \cdot g = 0,1 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg} = 1 \text{ N}.$$

All'inizio della caduta la velocità è ancora molto bassa e così anche la perdita nell'aria di quantità di moto. A una velocità di 2 m/s , la corrente di quantità di moto che defluisce nell'aria ha ancora un'intensità inferiore a $0,1 \text{ N}$, vedi fig. 4.7. La perdita è quindi ancora piccola rispetto alla corrente di quantità di moto di 1 N che arriva dalla Terra. Questa perdita però aumenta rapidamente e alla fine la palla perde nell'aria esattamente la quantità di moto che riceve dalla Terra. Da quel momento in poi la sua quantità di moto non aumenta più. Dalla fig. 4.7 leggiamo che a quel punto la palla ha una velocità di 7 m/s .

La fig. 4.9 mostra la velocità della nostra palla in funzione del tempo: all'inizio la velocità aumenta linearmente con il tempo, si comporta come una palla in caduta libera. A poco a poco però la perdita aumenta. Alla fine, quando le quantità di moto che fluiscono dalla e alla palla sono uguali, la sua quantità di moto, e di conseguenza la sua velocità, non aumenta più. Ha raggiunto la sua *velocità limite*. La palla si trova in uno stato di equilibrio dinamico.

Lasciamo ora cadere un'altra palla. Deve avere lo stesso diametro (30 cm) ma essere quattro volte più pesante della prima, fig. 4.8, parte destra:

$$m = 0,4 \text{ kg}.$$

Dalla Terra, attraverso il campo gravitazionale, fluisce nella palla una corrente di quantità di moto di

$$F = m \cdot g = 0,4 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg} = 4 \text{ N}.$$

A che velocità la palla smette di diventare più rapida? Lo chiediamo nuovamente al diagramma in fig. 4.7. La corrente di quantità di moto persa è uguale alla corrente di quantità di moto che arriva dalla Terra quando la velocità è di 14 m/s . La palla

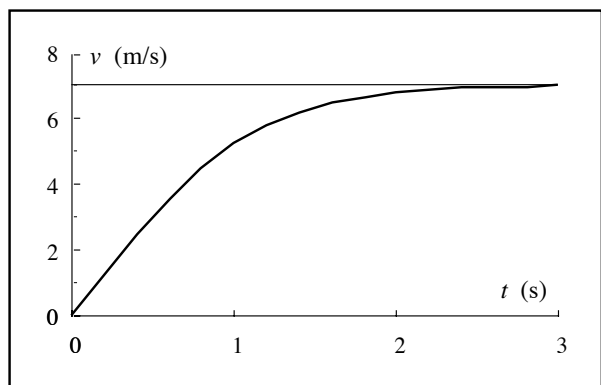


Fig. 4.9. In presenza di attrito con l'aria, la velocità di un corpo che cade aumenta fino a una velocità limite.

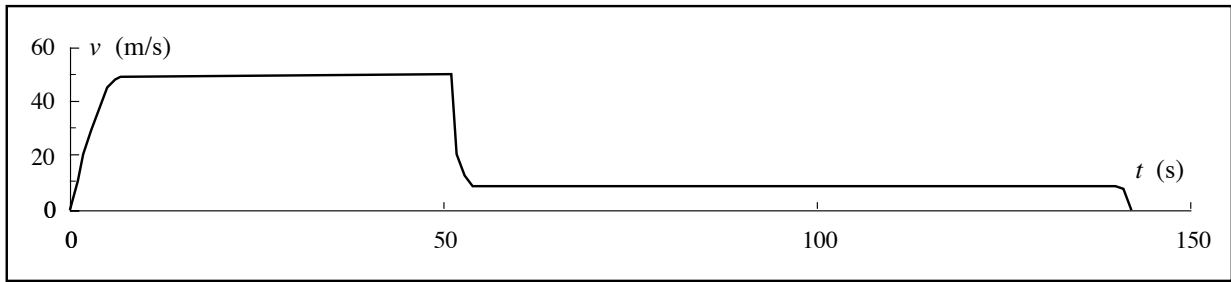


Fig. 4.10. Velocità di una persona che si lancia con il paracadute in funzione del tempo

pesante raggiunge quindi l'equilibrio dinamico a una velocità superiore rispetto alla palla leggera.

A velocità elevate l'attrito dell'aria non è più trascurabile.

La velocità di un corpo in caduta aumenta solo fino a una velocità limite. La velocità limite dipende dalla forma del corpo. Per corpi pesanti è maggiore che per corpi leggeri.

Un'applicazione interessante dei nostri ragionamenti è il lancio con il paracadute. La persona che si lancia salta dall'aereo e in pochi secondi raggiunge una velocità di circa 50 m/s. Poi "cade" per parecchio tempo a questa velocità. La corrente di quantità di moto che fluisce nella persona attraverso il campo gravitazionale ha la stessa intensità di quella che defluisce a causa dell'attrito.

A circa 400 m dal suolo si apre il paracadute. L'apertura del paracadute significa che improvvisamente la resistenza dell'aria aumenta notevolmente. La corrente di quantità di moto che defluisce diventa improvvisamente molto più intensa di quella che affluisce. In questo modo la quantità di moto diminuisce. Con la quantità di moto diminuisce anche la velocità e quindi le perdite dovute all'attrito. Alla fine la corrente di perdita di quantità di moto, raggiunge nuovamente il valore della corrente gravitazionale di quantità di moto, però a una velocità relativamente bassa: a circa 4 m/s. Il paracadute ora fluttua fino a terra con la persona appesa, a una velocità bassa e costante. In fig. 4.10 è riportata la velocità della persona che si lancia in funzione del tempo.

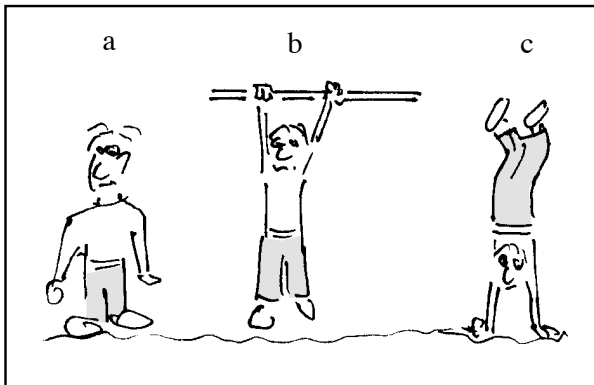


Fig. 4.11. Independentemente dai suoi tentativi, la persona non riesce a liberarsi della sensazione di peso.

In mancanza d'aria o di un altro mezzo che generi attrito, i nostri ragionamenti sulla velocità limite non sono validi. La Luna non ha atmosfera. Di conseguenza i corpi cadono veramente allo stesso modo: un foglio di carta cade a terra alla stessa velocità di un sasso. Possiamo osservarlo anche sulla Terra. Dobbiamo solo eseguire gli esperimenti di caduta in un recipiente dal quale sia stata pompata l'aria. Lasciamo cadere alcuni piccoli oggetti di massa molto diversa in un tubo di vetro da cui sia stata tolta l'aria. Come previsto cadono tutti assieme.

Esercizio

Che velocità limite raggiunge una palla di 30 cm di diametro e con una massa di 0,8 kg?

4.6 L'assenza di peso

L'uomo in fig. 4.11a si sente pesante, il suo corpo deve portare la pesante testa e i suoi piedi sono messi anche peggio: devono portare tutto il corpo. L'uomo ha un'idea, vedi fig. 4.11b. Le gambe sono alleggerite. In compenso ora sono le braccia che devono reggere tutto il carico. In fig. 4.11c vediamo il suo terzo tentativo di liberarsi del suo peso - nuovamente infruttuoso.

Quello che disturba l'uomo in fig. 4.11 è la "sensazione di peso". Vogliamo provare a definire fisicamente questa sensazione. Ciò che l'uomo avverte in ognuno dei tre casi sono le correnti di quantità di moto che fluiscono nel suo corpo. In ogni parte del corpo fluisce quantità di moto attraverso il campo gravitazionale e questa quantità di moto deve essere deviata e rifluire alla Terra. In fig. 4.12 sono schizzate queste correnti per una persona in piedi: fluisce quantità di moto nella testa, nelle braccia, nel busto, ecc. Tutta questa quantità di moto deve defluire alla Terra attraverso le gambe e i piedi. La corrente di quantità di moto ha quindi l'intensità massima nei piedi.

Consideriamo ora una sorta di modello di persona: è composto da due blocchi posti l'uno sopra l'altro (in un certo senso la parte superiore del corpo e quella inferiore), fig. 4.13. Vediamo che l'intensità della corrente di quantità di moto, è doppia sulla superficie inferiore del blocco sottostante rispetto alla superficie inferiore del blocco sovrastante.

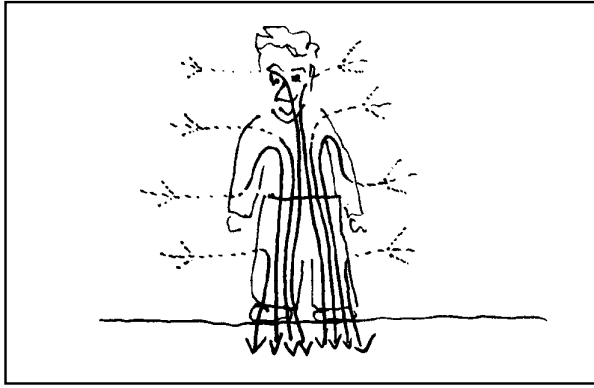


Fig. 4.12. Le correnti di quantità di moto che fluiscono nella persona attraverso il campo gravitazionale, devono nuovamente defluirne.

Vogliamo mettere questa "persona" in stato di assenza di peso: in uno stato nel quale nessuna corrente di quantità di moto la attraversa. In altre parole: in uno stato nel quale nessuna delle sue parti è sottoposta a compressione o trazione.

Probabilmente penserai che per farlo si dovrebbe trasportare la persona molto, molto lontano dalla Terra, in un punto dove il campo gravitazionale terrestre non è più percepibile. Lì, nessuna corrente di quantità di moto fluirebbe nella nostra persona. Quindi nessuna corrente di quantità di moto potrebbe attraversarla. Effettivamente questa sarebbe una possibilità. C'è anche un altro metodo, molto più semplice: lasciamo che la quantità di moto entri nella persona ma non ne esca più. Anche in questo caso non c'è quantità di moto che fluisce attraverso la persona e lei si sente senza peso.

Come possiamo fare? Molto semplice. Per fare in modo che la quantità di moto non esca dalla persona, cioè per fare in modo che la quantità di moto non defluisca a terra, basta interrompere il collegamento con la Terra. Quindi dobbiamo semplicemente lasciar cadere la persona in caduta libera, fig. 4.14. Ora in ogni blocco (in ogni parte della persona) e in ogni punto dei blocchi, affluisce quantità di moto dal campo gravitazionale. Ma questa quantità di moto non circola più nei blocchi. In particolare nessuna quantità di moto fluisce da un blocco all'altro. La conseguenza: nessun punto è più

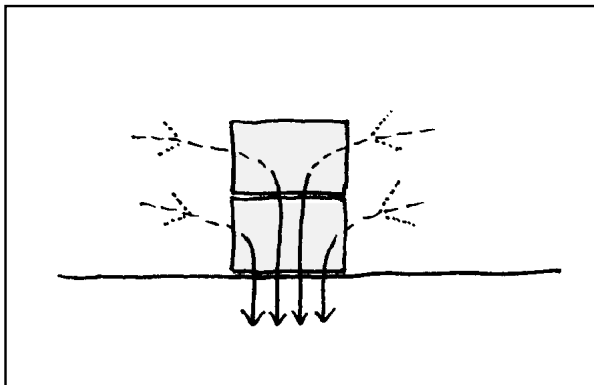


Fig. 4.13. Un modello di persona. È composto unicamente da una parte superiore e una inferiore.

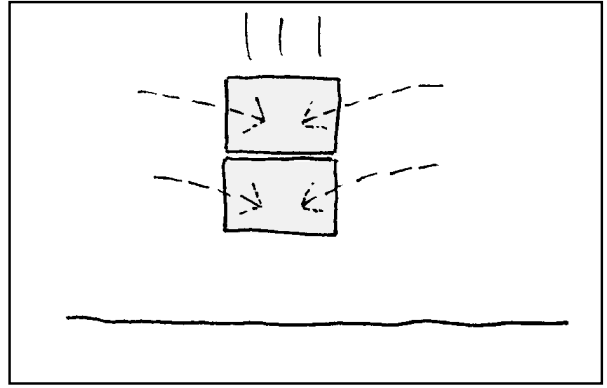


Fig. 4.14. Un corpo in caduta libera è in assenza di peso. Non è attraversato da nessuna corrente di quantità di moto.

sottoposto a compressione o trazione. Il blocco inferiore non sente più il peso di quello superiore.

Per te, cioè per una persona vera, valgono naturalmente le stesse conclusioni: se ti lanci da qualche parte, fintanto che cadi sarai senza peso. Anche quando salti verso l'alto sei in assenza di peso, dal momento in cui lasci il suolo fino a quando tocchi terra nuovamente.

La caduta dura però così poco tempo, che non possiamo renderci veramente conto della sensazione di assenza di peso. Facciamo quindi un esperimento con il nostro modello di persona, fig. 4.15. I due blocchi sono appoggiati su una lastra appesa con dei fili come il piatto di una bilancia. Tra il blocco inferiore e quello superiore è inserita una sottile tavola collegata al muro mediante una corda elastica tesa. La corda elastica estrarrebbe la tavola, se questa non fosse incastrata dal peso del blocco sovrastante.

Ora l'esperimento: tagliamo il filo che sostiene il tutto. Nello stesso istante la tavola schizza via tirata dalla corda elastica. Perché? Per un breve tempo la torre di blocchi era in caduta libera. Durante questo tempo era in assenza di peso. Il blocco sovrastante non premeva più su quello inferiore, ha lasciato andare la tavola.

Saprai già che gli astronauti nella loro navicella spaziale si sentono senza peso. Qual è la spiegazione? È perché sono così lontani dalla Terra? Per

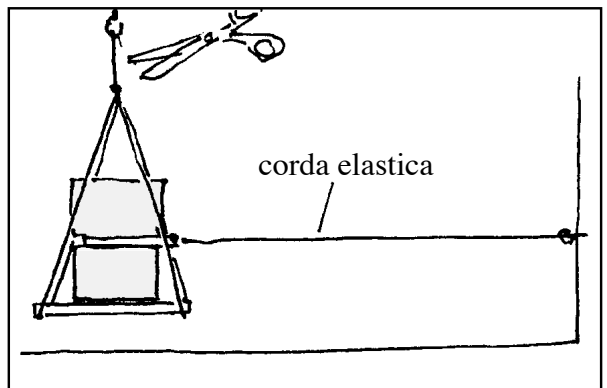


Fig. 4.15. Durante la caduta libera i blocchi sono in assenza di peso. La tavola, prima incastrata, viene lasciata libera.

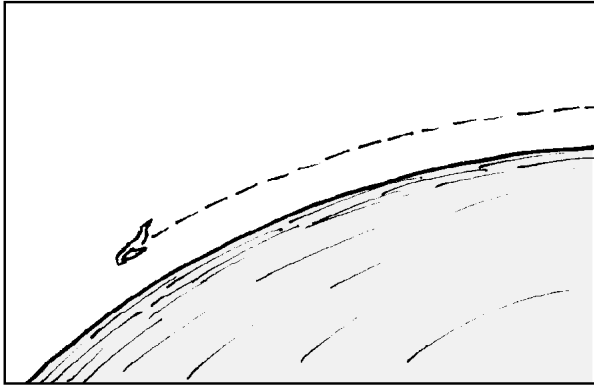


Fig. 4.16. Lo space shuttle vola a soli 250 km di altezza, dove la costante locale è di poco inferiore rispetto alla superficie terrestre.

niente. Lo space shuttle vola a circa 250 km di altezza. Molto poco se paragonato al diametro terrestre. In effetti vola appena sopra la superficie terrestre, fig. 4.16. Lì il campo gravitazionale della Terra è quasi tanto denso quanto quaggiù da noi: la costante locale a 250 km di altezza è $g = 9,64 \text{ N/kg}$, quindi appena più piccola di quella sulla superficie terrestre.

La spiegazione dell'assenza di peso deve essere un'altra. È esattamente la stessa che avevamo trovato per gli oggetti in caduta: una navicella spaziale è, dopo che i razzi propulsori si sono spenti, un corpo in caduta libera. Allora perché una navicella spaziale, o un satellite, non precipita sulla Terra? A dire la verità è esattamente quello che fa. Ma lo fa mantenendo comunque una grande quantità di moto in direzione orizzontale. Cade quindi come un sasso lanciato orizzontalmente; solo che cade così lontano da "cadere sempre oltre l'orizzonte". Quindi "cade" sempre in cerchio e non tocca mai la superficie terrestre.

I corpi in caduta libera sono in assenza di peso.

Esercizi

1. Un astronauta, nella sua navicella spaziale, ha davanti a sé due oggetti dallo stesso aspetto ma dalle masse diverse. Può scoprire quale dei due ha la massa maggiore e se sì, come?
2. Una navicella spaziale si trova in un punto così lontano dalla Terra che il campo gravitazionale è impercettibile. Gli astronauti desidererebbero provare nuovamente la sensazione di peso. Cosa possono fare, senza dover tornare sulla Terra o andare su un altro corpo celeste?

4.7 La densità delle sostanze

"Cosa pesa di più: 1 kg di ferro o 1 kg di legno?" Tutti conoscono questa domanda trabocchetto. La risposta naturalmente dev'essere: "hanno lo stesso peso". Chi non sta attento e non sente il "kg" dirà probabilmente che è più pesante il ferro.

Ci rendiamo conto che le parole "pesante" e "leggero" vengono usate con due significati leggermente diversi:

- da un lato per definire un peso o una massa: 1,5 kg di zucchero pesano più di 0,8 kg di farina.
- dall'altro per esprimere una caratteristica della sostanza: diciamo che il ferro è più pesante del legno perché un pezzo di ferro ha una massa più grande di un pezzo di legno dello stesso volume.

Questo secondo significato delle parole "pesante" e "leggero" è espresso quantitativamente dalla *densità* della sostanza. Con densità si intende il quoziente tra la massa m e il volume V , in breve massa su volume:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

L'unità SI ottenuta è il kg/m^3 . In tabella 4.2 sono elencate le densità di alcune sostanze.

C'è ancora un punto da considerare: alcune sostanze, in particolare quelle gassose, si possono comprimere facilmente. In questo modo si può modificare la loro densità variando la pressione o la temperatura. Se diamo una densità, dobbiamo anche dire a che pressione e a che temperatura è valida. Per sostanze solide e liquide questo effetto è comunque molto piccolo. I valori della tabella si riferiscono alle *condizioni normali*: valgono per $p = 1 \text{ bar}$ e $\vartheta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Dai valori nella tabella appare evidente che le densità dei gas sono molto più piccole di quelle dei liquidi e dei solidi. Prendiamo nota di questa regola empirica:

A condizioni normali la densità di liquidi e solidi è circa 1000 volte maggiore di quella dei gas.

Tabella 4.2.

La densità di alcune sostanze a $p = 1 \text{ bar}$ e $\vartheta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

	$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$
legno di faggio	600 - 900
granito	2600
alluminio	2700
ferro	7800
rame	8960
oro	19300
benzina	720
etanolo (alcol)	790
acqua	998
tricloroetilene	1460
mercurio	13550
idrogeno	0,090
azoto	1,25
aria	1,29
ossigeno	1,43
anidride carbonica	1,9

Per misurare la densità di una sostanza, prendiamo una quantità qualsiasi di quella sostanza, ne misuriamo la massa m e il volume V e dividiamo m per V .

A volte le misurazioni di m e V sono molto semplici, a volte invece no. Ad esempio: per determinare la densità della benzina è sufficiente versarne 1 l = 0,001 m³ e pesarlo. Troviamo $m = 0,72$ kg. Per la densità si ottiene

$$\rho_{\text{benzina}} = \frac{0,72 \text{ kg}}{0,001 \text{ m}^3} = 720 \text{ kg/m}^3$$

Per una sostanza solida, la determinazione del volume è più difficile se il corpo ha una forma irregolare. La fig. 4.17 mostra come si può procedere. Immergiamo il corpo in acqua e osserviamo il volume d'acqua che sposta.

Per la determinazione della densità dei gas il problema maggiore è misurare la massa. Vogliamo trovare la densità dell'aria. A questo scopo prendiamo un recipiente del volume di 1 l che abbia una chiusura a tenuta stagna e lo pesiamo. In seguito, con una pompa a vuoto, ne estraiamo l'aria e lo pesiamo nuovamente. La differenza dei risultati delle pesate deve essere la massa dell'aria che era nel recipiente all'inizio.

Esercizi

1. Si pesano 1,6 litri di un liquido. Si trova $m = 1,3$ kg. Qual è la densità del liquido?
2. Una pietra da pavimentazione in granito pesa 2,2 kg. Che volume ha?
3. Il serbatoio di un'auto può contenere 40 l. Quanto pesa la benzina del serbatoio pieno?
4. Una lamiera di rame, lunga 120 cm e larga 80 cm, pesa 8,2 kg. Che spessore ha la lamiera?
5. Qual è la massa dell'aria nel salotto di casa vostra?

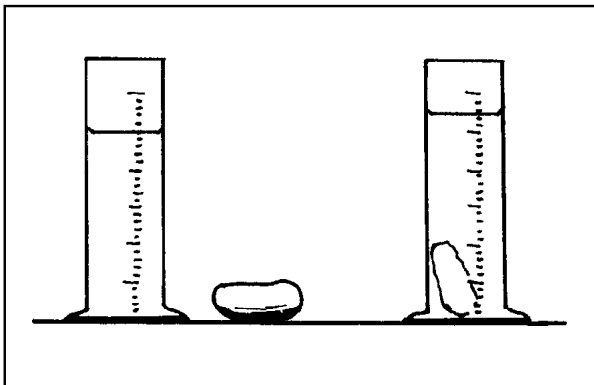


Fig. 4.17. Per misurare il volume di un corpo solido, misuriamo il volume dell'acqua che sposta.

4.8 Quando un corpo galleggia e quando affonda

Un pezzo di legno, un po' di benzina o una goccia d'olio, galleggiano sull'acqua. Un pezzo di ferro, rame o alluminio va giù, affonda. E una goccia d'acqua nell'acqua: galleggia o affonda? Una domanda senza senso, penserai. Non si può distinguere una goccia d'acqua da tutto il resto. Però non è per niente difficile renderla distinguibile: semplicemente colorandola. Il risultato: non galleggia e non affonda; rimane sospesa.

Se un corpo può o no galleggiare in un liquido, dipende da quanto è pesante. Ma cosa si intende qui con "pesante" e "leggero"? Sicuramente non si intende la massa. Un pezzo di legno galleggia sull'acqua indipendentemente dalla sua massa. Quello da cui dipende è piuttosto la densità. Un corpo galleggia su un liquido se la sua densità è minore di quella del liquido. Se la densità è maggiore affonda e se la densità del corpo e del liquido sono uguali, allora il corpo rimane sospeso.

(Abbiamo usato la parola corpo in senso lato: potrebbe anche essere un'altra porzione di liquido.)

Mettiamo alla prova la nostra affermazione con acqua e benzina. Una goccia d'acqua versata in un recipiente di benzina affonda. Una goccia di benzina versata in un recipiente pieno d'acqua, si spande sulla superficie.

Si tratta in entrambi i casi dello stesso fenomeno. Lo si nota chiaramente facendo il seguente esperimento: si versano in un recipiente di vetro alcuni liquidi dalle densità diverse, per esempio tricloroetilene, acqua e benzina. I tre liquidi si stratificano in modo che più in basso ci sia il liquido con la densità maggiore, sopra quello con la seconda maggiore densità e così via, fig. 4.18. Possiamo mettere nel recipiente anche un paio di corpi solidi. Un corpo metallico andrà a fondo del tutto; un corpo di gomma dura ($\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$) galleggia sul tricloroetilene ma non sull'acqua; un corpo di una materia plastica più leggera ($\rho = 900 \text{ kg/m}^3$) galleggia sull'acqua ma non sulla benzina; un corpo di legno infine galleggia sulla benzina. Le sette sostanze si ordinano quindi secondo la densità.

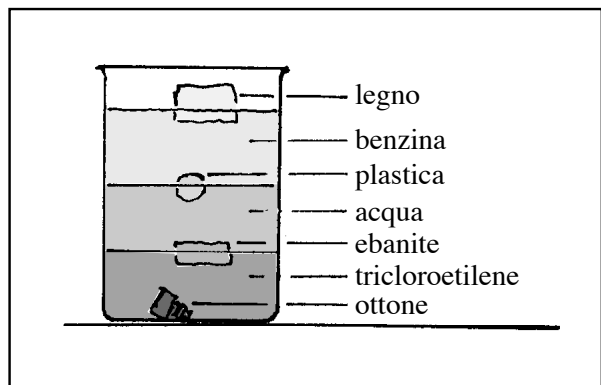


Fig. 4.18. I 7 corpi (liquidi e solidi) si ordinano secondo la loro densità.

Visto che i gas hanno una densità inferiore ai liquidi, tutti i gas "galleggiano" su tutti i liquidi. Una bolla d'aria nell'acqua o una bolla di anidride carbonica in una gazzosa, salgono verso l'alto.

Finora ci siamo chiesti quali corpi galleggiano sui liquidi. Possiamo però porre la stessa domanda per i gas. Ovviamente tutte le sostanze liquide e solide affondano nei gas: goccioline d'acqua e particelle solide nell'aria cadono. Per contro un gas può "galleggiare" su un altro. Questo fenomeno è sfruttato nei palloni aerostatici. Se un pallone aerostatico è riempito con un gas la cui densità è inferiore a quella dell'aria, per esempio con idrogeno, il pallone sale (a condizione che l'involucro del pallone non sia troppo pesante, visto che anche lui deve essere sollevato dall'idrogeno). I dirigibili, molto diffusi all'inizio del novecento, funzionano secondo questo principio.

Riassumiamo:

Un corpo la cui densità è inferiore a quella dell'ambiente circostante, sale verso l'alto. Se la sua densità è superiore a quella dell'ambiente affonda.

Esercizi

1. Esistono liquidi sui quali il ferro galleggia? Motiva la risposta!
2. Un pallone aerostatico viene gonfiato con diossido di carbonio. Salirà o scenderà? Motiva la risposta!

4.9 La relazione tra pressione e altezza nei liquidi e nei gas

Andando sott'acqua in piscina sentiamo una "pressione nelle orecchie"; la stessa cosa succede quando un ascensore sale o scende rapidamente da un palazzo molto alto.

In entrambi i casi la pressione cambia e le orecchie sono il nostro organo sensoriale sensibile alle variazioni di pressione.

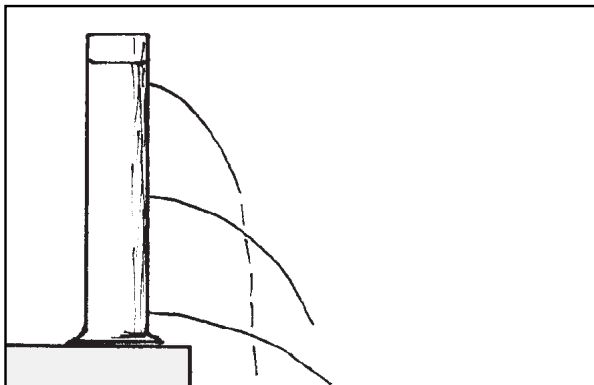


Fig. 4.19. La pressione dell'acqua aumenta verso il basso.

Riempiamo d'acqua un recipiente alto che su un fianco ha tre fori a diverse altezze, fig. 4.19. L'acqua schizza da tutte e tre le aperture. La pressione che spinge fuori l'acqua è detta *pressione gravitazionale* perché è generata dal peso dell'acqua, per il fatto che l'acqua è pesante. Il getto d'acqua dell'apertura più in basso arriva più lontano. La pressione gravitazionale deve essere massima. Il getto più in alto va meno lontano di tutti. La pressione qui è minima. La pressione gravitazionale dell'acqua quindi aumenta dall'alto verso il basso.

Possiamo misurare l'aumento di pressione e constatiamo: ogni 10 m di profondità d'acqua la pressione gravitazionale aumenta di 1 bar. Nel punto più profondo del mare, cioè a circa 10 000 m di profondità, la pressione vale quindi 1000 bar. Adesso capisci perché le capsule di immersione con le quali si raggiungono le grandi profondità devono avere pareti molto spesse.

Le centrali idroelettriche hanno spesso l'aspetto mostrato schematicamente in fig. 4.20. In alta montagna si trova un lago artificiale: un bacino di accumulazione per raccogliere l'acqua di diversi fiumi e ruscelli. Alcuni grossi tubi collegano il lago artificiale con la vera e propria centrale a valle, con i generatori delle turbine. Se per esempio il lago è situato 500 m più in alto delle turbine, la pressione all'entrata delle turbine è di 50 bar.

Lo stesso fenomeno, cioè l'aumento della pressione con la profondità, si osserva anche nell'atmosfera terrestre, o in altre parole: nel "mare d'aria" che circonda la Terra. Sul "fondo del mare", cioè sulla superficie terrestre, la pressione gravitazionale vale, come già sai, circa 1 bar. Se si sale diminuisce, vicino alla superficie terrestre al ritmo di circa 1 mbar ogni 10 m. Salendo sempre più in alto non diminuisce solo la pressione ma anche la variazione di pressione per differenza di altezza (vedi anche paragrafo 2.2)

La pressione gravitazionale nei liquidi e nei gas aumenta con la profondità.

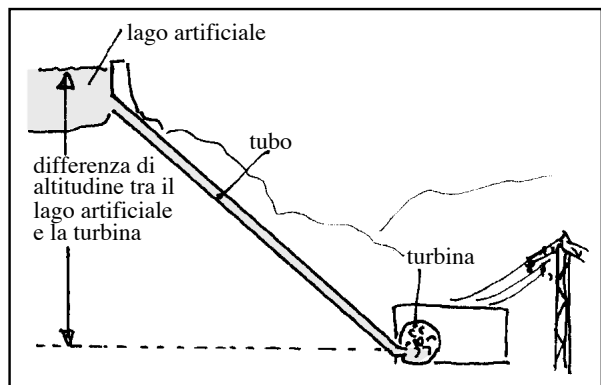


Fig. 4.20. La pressione all'entrata della turbina dipende dalla differenza di altitudine tra la turbina e il lago artificiale.

5. Quantità di moto e energia

5.1 La quantità di moto come portatore di energia

Se facciamo uno sforzo fisico consumiamo energia. Cosa si intende per "consumare"? Per esempio che si deve mangiare molto per poter sostenere lo sforzo. Mangiando riceviamo energia e durante lo sforzo la cediamo nuovamente. "Consumi molta energia" significa quindi "molta energia fluisce attraverso di te, ricevi e cedi molta energia".

La persona in fig. 5.1 trascina una cassa sul pavimento. (Sicuramente potrebbe trasportare la cassa in modo meno faticoso, ma in quel caso non potremmo discutere bene il nostro problema.) Fa uno sforzo, cede energia. Dove va a finire questa energia? Va alla faccia inferiore della cassa, lì crea calore e poi si disperde nell'ambiente con il calore.

Vogliamo ora esaminare il trasporto di energia tra persona e cassa. Il primo punto da chiarire è: qual è il portatore di energia? Parallelamente alla corrente di energia, nella corda fluisce anche una corrente di quantità di moto. Concludiamo quindi che il portatore di energia cercato sia la quantità di moto.

La quantità di moto è un portatore di energia.

Notiamo subito che non tutte le correnti di quantità di moto sono accompagnate da una corrente di energia: come sappiamo la corrente di quantità di moto in fig. 5.1 fluisce dalla cassa alla persona attraverso la Terra. L'energia per contro, va per la sua strada a partire dalla faccia inferiore della cassa. Quindi la quantità di moto che rifluisce alla persona non trasporta energia.

Da cosa dipende allora l'intensità della corrente di energia? Formulato diversamente: come dobbiamo procedere se vogliamo trasportare il massimo di energia con una corda o una sbarra?

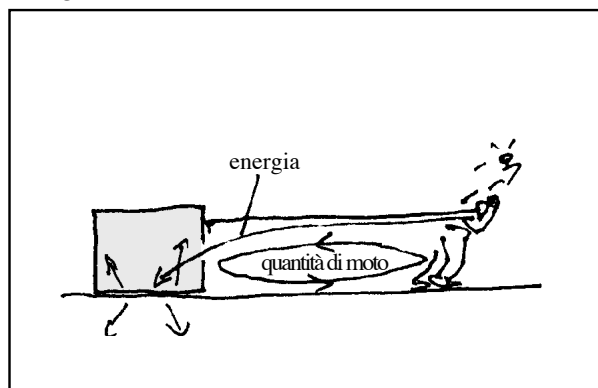


Fig. 5.1. La quantità di moto fluisce in circuito chiuso. L'energia fluisce dai muscoli della persona alla faccia inferiore della cassa.

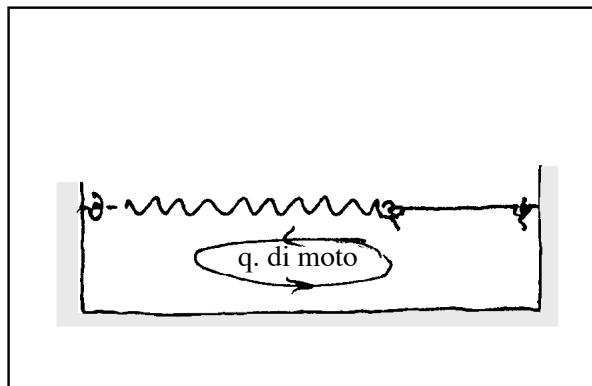


Fig. 5.2. Anche se fluisce una corrente di quantità di moto, in nessun punto fluisce una corrente di energia.

Se agganciamo una corda a una parete, fig. 5.2, fluisce una corrente di quantità di moto ma sicuramente non una corrente di energia, visto che niente si scalda e niente si muove. Qual è la differenza tra le corde in fig. 5.1 e fig. 5.2? La prima corda si muove, la seconda no. Vediamo quindi che il trasporto di energia dipende dalla velocità con cui si muove il conduttore di quantità di moto.

Inoltre, l'intensità della corrente di energia dipende ovviamente anche dall'intensità della corrente di quantità di moto, visto che se la corda non è sottoposta a tensione meccanica non può essere usata per trasportare energia.

Abbiamo così ottenuto un risultato importante:

L'intensità P della corrente di energia che attraversa una corda dipende

- dall'intensità F della corrente di quantità di moto che attraversa la corda;
- dalla velocità v della corda.

Vogliamo chiarire l'aspetto quantitativo di questa relazione. Da che equazione sono collegate tra loro le grandezze P , F , e v ?

La dipendenza dell'intensità della corrente di energia P dall'intensità della corrente di quantità di moto F è facile da trovare. In fig. 5.3 si vedono dall'alto due casse assolutamente identiche che vengono trascinate sul pavimento. Confrontiamo i due pezzi di corda A e B. Si muovono tutti e due alla stessa velocità. Sia la corrente di quantità di moto che la corrente di energia si suddividono equamente al nodo N: la corrente di quantità di moto nella corda B è la metà che nella corda A e la corrente di energia pure. Quindi a velocità uguali l'intensità della corrente di energia è proporzionale all'intensità della

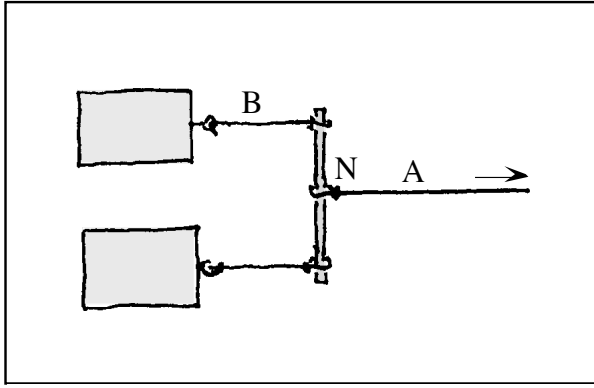


Fig. 5.3. Due casse, viste da sopra, sono trascinate sul pavimento.

corrente di quantità di moto:

$$P \sim F$$

Per trovare la relazione tra P e v facciamo un esperimento. Una cassa viene tirata con l'aiuto di un "paranco", fig. 5.4. Confrontiamo i pezzi di corda A e B. Dapprima per la corrente di energia: tutta l'energia che da destra fluisce in B, dalla carrucola in avanti continua nella corda A. Nella corda C non può fluire energia visto che C non si muove. Abbiamo quindi:

$$P_A = P_B$$

Ora confrontiamo le velocità di A e B. Quando la cassa si sposta di un certo tratto verso destra, l'estremità destra di B si sposta verso destra di un tratto lungo il doppio. Poniamo che la cassa si sposti di 10 cm, allora anche la carrucola si sposta di 10 cm. Se la corda B non passasse sulla carrucola ma fosse legata alla corda A, anche B si sposterebbe di 10 cm verso destra. Ma a causa della carrucola la corda C si accorcia di 10 cm e questi 10 cm si aggiungono alla corda B. B si allunga quindi di 20 cm. Questo significa anche che la velocità di B è sempre doppia di quella di A. Vale perciò:

$$v_B = 2v_A$$

Confrontiamo infine le correnti di quantità di moto in A e B. Possiamo farlo solo con una misurazione. L'intensità della corrente di quantità di moto in B è esattamente la metà che in A. (In C tra l'altro è

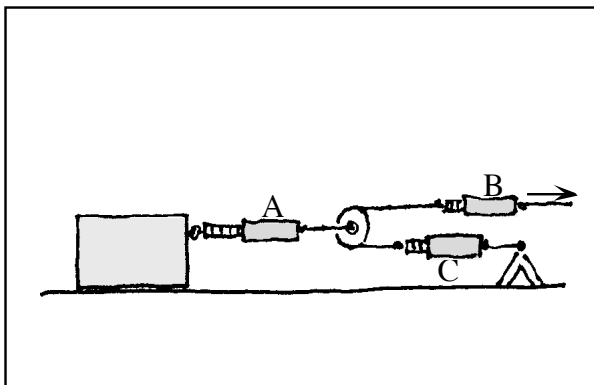


Fig. 5.4. L'intensità della corrente di quantità di moto è doppia nella corda A che nella corda B. La velocità della corda A è la metà della velocità della corda B.

esattamente come in B, così che la regola dei nodi è rispettata.) Quindi possiamo scrivere:

$$F_A = 2F_B$$

I tre risultati assieme sono descritti correttamente dalla relazione

$$P \sim v \cdot F,$$

visto che questa proporzionalità, da un lato ci dice che P è proporzionale a F se la velocità è mantenuta costante e dall'altro dice: se raddoppiamo v e contemporaneamente dimezziamo F , allora P resta costante, proprio quello che abbiamo trovato dal nostro esperimento con la carrucola.

Se trasportiamo energia con il portatore quantità di moto, l'intensità della corrente di energia è proporzionale all'intensità della corrente di quantità di moto e alla velocità con la quale si muove il conduttore.

Per fare di questa proporzionalità un'equazione, dovremmo ancora inserire un coefficiente di proporzionalità. Fortunatamente le unità SI delle tre grandezze coinvolte sono scelte in modo tale che vale semplicemente:

$$P = v \cdot F$$

Questo è il risultato cercato. Possiamo calcolare l'intensità della corrente di energia nella nostra corda, se conosciamo l'intensità della corrente di quantità di moto nella corda e la velocità della corda.

Un esempio: tiriamo una corda in cui è inserito un dinamometro. Il dinamometro segna 120 N, la corda si muove a 0,5 m/s. Per l'intensità della corrente di energia si ottiene:

$$P = v \cdot F = 0,5 \text{ m/s} \cdot 120 \text{ N} = 60 \text{ W}.$$

Tieni presente che, affinché l'intensità della corrente di energia esca in unità SI, la velocità deve essere data in m/s e l'intensità della corrente di quantità di moto in N.

La formula

$$P = v \cdot F$$

si può trasformare ottenendo un'equazione che per alcuni problemi è più comoda. Sostituiamo P con E/t e v con s/t :

$$\frac{E}{t} = \frac{s}{t} \cdot F$$

e moltiplichiamo a destra a e sinistra per t . Si ottiene

$$E = s \cdot F$$

L'equazione ci dice ad esempio: se spingiamo una sbarra e la spostiamo di un tratto s , attraverso la sbarra fluisce una quantità di energia pari a $s \cdot F$, dove F è l'intensità della corrente di quantità di moto che fluisce nella sbarra mentre si spinge.

Un esempio: tiriamo una corda in modo che fluisca una corrente di quantità di moto di 120 N e che la corda si sposti di 2 m. Quanta energia viene traspor-

tata attraverso la corda? Applichiamo la nostra nuova formula. Con $F = 120 \text{ N}$ e $s = 2 \text{ m}$ si ottiene $E = s \cdot F = 2 \text{ m} \cdot 120 \text{ N} = 240 \text{ Nm} = 240 \text{ J}$

Esercizi

1. Un trattore traina un rimorchio a 20 km/h su una strada piatta. Attraverso il gancio di traino fluisce una corrente di quantità di moto di 900 N. Qual è il consumo di energia del rimorchio? (Qual è l'intensità della corrente di energia tra trattore e rimorchio?) Dove finisce la quantità di moto che fluisce nel rimorchio, dove finisce l'energia?
2. Un autocarro traina un rimorchio su una strada piatta da una città a un'altra. La distanza tra le città è di 35 km. Il gancio di traino è attraversato da una corrente di quantità di moto di 900 N. Quanta energia è fluita in totale dall'autocarro al rimorchio?
3. La cinghia di trasmissione di una macchina, si muove a una velocità di 10 m/s. La corrente di energia trasportata con la cinghia ha un'intensità di 800 W. Con che forza la cinghia tira sulla puleggia? (Quanto intensa è la corrente di quantità di moto nella cinghia?)
4. Una gru solleva un carico di 50 kg a una velocità di 0,8 m/s. Quanto è forte la corrente di energia attraverso il cavo della gru? Il carico viene sollevato di 5 m. Quanto dura il processo? Quanta energia attraversa il cavo in questo lasso di tempo?

5.2 Contenitori meccanici di energia

a) Corpi deformati elasticamente come contenitori di energia

Tendiamo una lunga molla rigida, fig. 5.5. Facciamo fatica perché per farlo ci vuole energia. Consideriamo l'estremità destra della molla (il punto A in fig. 5.5). Questo punto della molla è sottoposto a tensione meccanica, vale a dire che è attraversato da una corrente di quantità di moto F , e si muove a velocità v . Secondo la nostra formula $P = v \cdot F$ nel punto A fluisce anche una corrente di energia. Consideriamo ora l'estremità sinistra della molla (il punto C). La corrente di quantità di moto è uguale a quella in A. Visto però che C non si muove non c'è più la corrente di energia. Quindi l'energia che

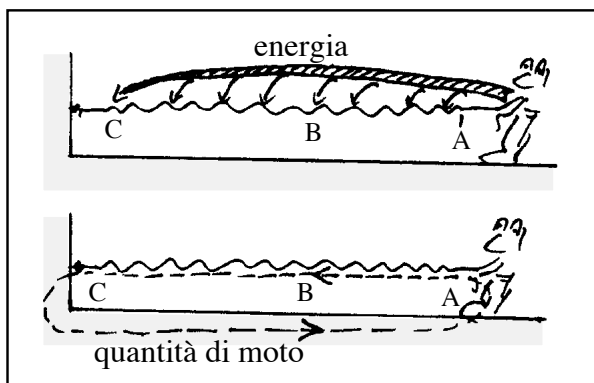


Fig. 5.5. Mentre la molla viene tesa, dall'estremità destra fluisce energia nella molla.

affluisce nel punto A non esce da C. Viene immagazzinata nella molla.

Possiamo analizzare le correnti anche in altri punti della molla, per esempio in B, a metà della molla. La corrente di quantità di moto è nuovamente uguale a quella in A e in C. La velocità del centro della molla è esattamente la metà di quella di A. Quindi anche la corrente di energia è intensa la metà di quella che affluisce in A. Ciò è plausibile: metà dell'energia viene immagazzinata nella metà destra della molla e l'altra metà dell'energia continua a fluire verso la metà sinistra della molla. Possiamo estendere il ragionamento: in ogni terzo della molla viene immagazzinato un terzo dell'energia, in ogni quarto della molla viene immagazzinato un quarto dell'energia e così via. In breve: l'energia si distribuisce uniformemente su tutta la lunghezza della molla.

Se è possibile comprimere la molla senza che si allarghi lateralmente, anche in questo modo possiamo immagazzinare energia.

Una molla è un contenitore di energia. Maggiore è l'allungamento rispettivamente l'accorciamento della molla, più energia vi è immagazzinata.

Naturalmente questi ragionamenti non valgono solo per le molle ma per tutti quegli oggetti deformabili elasticamente: anche un estensore teso contiene energia così come una fionda tesa, un trampolino piegato o un pallone deformato, fig. 5.6.

b) Corpi in moto come contenitori di energia

Carichiamo di quantità di moto un'auto priva di attrito, come abbiamo già fatto spesso, fig. 5.7. Questa volta però, sappiamo che attraverso la corda non fluisce solo quantità di moto ma anche energia. Come la quantità di moto, nemmeno l'energia può lasciare l'auto. Quindi, tirando si accumula nell'auto sia quantità di moto sia energia.

Un corpo in moto contiene energia. Più la sua velocità è elevata, più energia contiene.

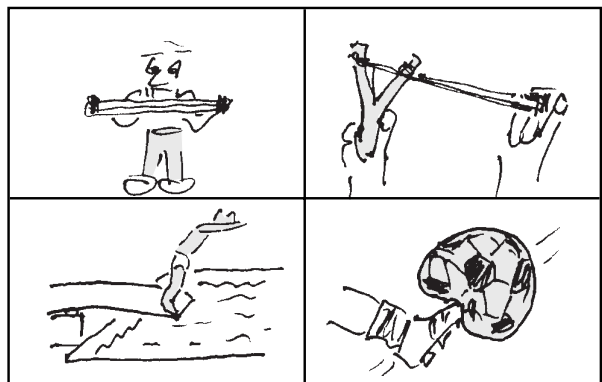


Fig. 5.6. In un estensore teso, in una fionda tesa, in un trampolino piegato e in un pallone deformato, è immagazzinata energia.

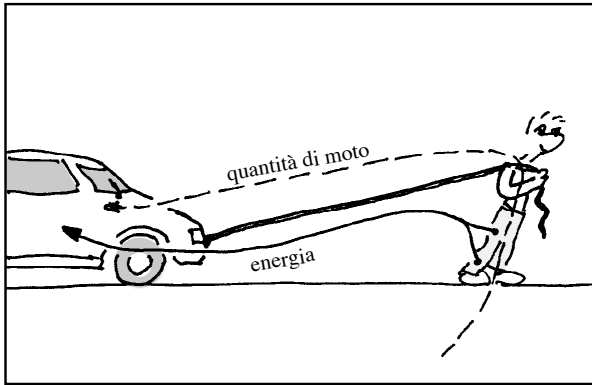


Fig. 5.7. Durante l'accelerazione, nell'auto oltre alla quantità di moto fluisce anche energia.

Se lasciamo che un'auto si fermi da sola, la sua quantità di moto defluisce a terra. L'energia prende un'altra strada. È utilizzata per creare calore. Il calore viene prodotto ovunque c'è attrito. L'energia si spande nell'ambiente: in parte nel terreno ma anche nell'auto e nell'aria.

L'energia contenuta in un carrello in moto si può portare in una molla e lì immagazzinarla: lasciamo che il carrello tenda una molla, fig. 5.8. Così facendo, il carrello si ferma. Ci sono due modi per tendere la molla: o ne fissiamo l'estremità sinistra alla parete e lasciamo che l'estremità destra sia tirata verso destra dal carrello, oppure fissiamo l'estremità destra alla parete e lasciamo che la sinistra sia tirata verso sinistra dal carrello. Il risultato è sempre lo stesso: una molla tesa carica di energia. Nel primo caso l'energia proveniva da un carrello carico con quantità di moto positiva, nel secondo da un carrello con quantità di moto negativa. Evidentemente entrambi i carrelli avevano però energia positiva.

L'energia di un corpo in moto è sempre positiva indipendentemente dalla direzione in cui si muove.

c) Il campo gravitazionale come contenitore di energia

Solleviamo un oggetto pesante, fig. 5.9. Anche in questo caso, oltre alla quantità di moto, nella corda

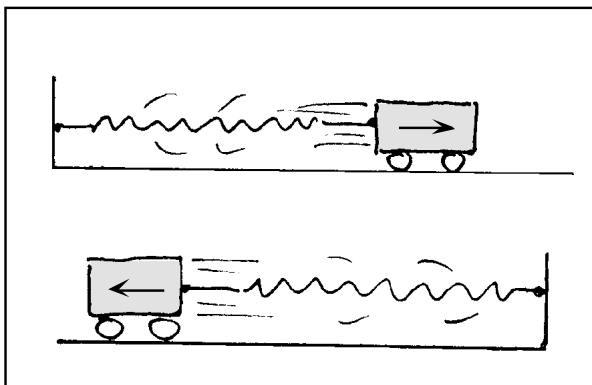


Fig. 5.8. Un carrello in movimento cede la sua energia a una molla. (a) Il carrello si muove verso destra. (b) Il carrello si muove verso sinistra.

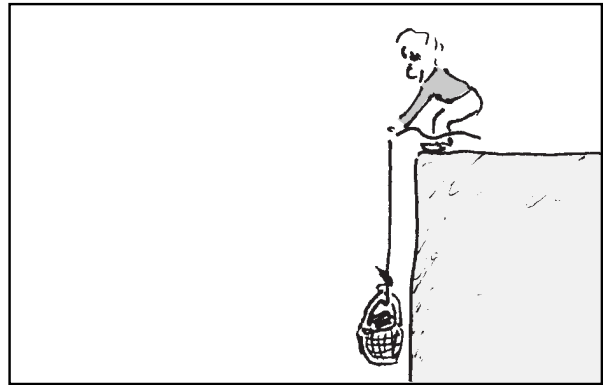


Fig. 5.9. Sollevando l'oggetto si immagazzina energia nel campo gravitazionale.

fluisce energia. Come sappiamo, la quantità di moto giunge al corpo dalla Terra attraverso il campo gravitazionale.

Possiamo immaginare il campo gravitazionale come una molla invisibile che tira il corpo. Esattamente come immagazziniamo energia in una molla tendendola, quando solleviamo un oggetto immagazziniamo energia nel campo gravitazionale. Se lasciamo ricadere l'oggetto, il campo gravitazionale rilascia questa energia.

Per sollevare un oggetto pesante ci vuole più energia che per sollevarne uno leggero. Quindi nel campo gravitazionale viene immagazzinata più energia se il corpo sollevato è pesante.

Il campo gravitazionale è un contenitore di energia. Più in alto si solleva un oggetto e più l'oggetto è pesante, più energia si mette nel campo gravitazionale.

L'energia del campo gravitazionale è sfruttata dalle centrali idroelettriche, fig. 5.10.

L'acqua dei fiumi e dei ruscelli d'alta montagna viene raccolta e condotta a valle con dei tubi. Incanalata verso il basso l'acqua, ricava energia dal campo gravitazionale. Scorrendo poi nelle turbine cede la sua energia. Quindi, nella turbina l'energia entra con il portatore "acqua". Dalla turbina l'energia prosegue verso il generatore con il portatore quantità di moto angolare.

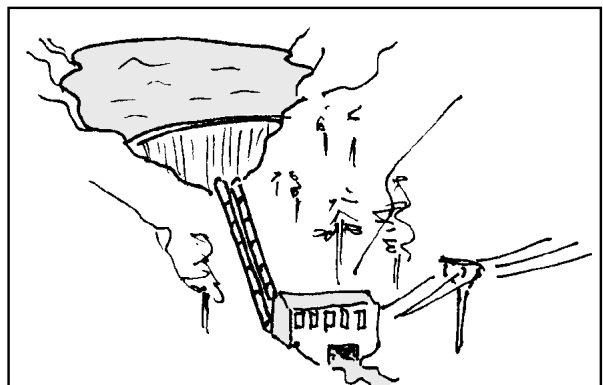


Fig. 5.10. Centrale idroelettrica. Scendendo nei tubi, l'acqua preleva energia dal campo gravitazionale. Nella turbina cede questa energia.

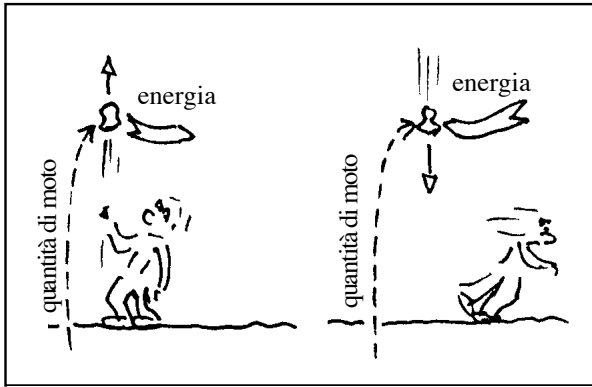


Fig. 5.11. Il percorso della quantità di moto e dell'energia in un oggetto lanciato verso l'alto.

5.3 I percorsi tortuosi dell'energia e della quantità di moto

Analizziamo ora due diversi moti: il moto di un sasso lanciato verso l'alto, fig. 5.11, e il moto di un corpo che oscilla avanti e indietro tra due molle, fig. 5.12. In entrambi i casi ci poniamo le domande:

- Che percorso segue l'energia?
- Che percorso segue la quantità di moto?

a) Il sasso lanciato verso l'alto

L'energia

Durante il lancio l'energia va dai muscoli della persona al sasso. Durante la salita l'energia fluisce nel campo gravitazionale. Nel punto di inversione, tutta l'energia è uscita dal sasso, durante la discesa fluisce nuovamente nel sasso dal campo gravitazionale. Nell'impatto con il suolo viene creato calore. L'energia si disperde nell'ambiente con il calore: nel sasso, nel terreno e nell'aria.

La quantità di moto

Nel lancio, la persona "pompa" quantità di moto negativa dalla Terra al sasso. Durante la salita, nel sasso fluisce quantità di moto (positiva) dalla Terra attraverso il campo gravitazionale e di conseguenza la quantità di moto negativa del sasso diminuisce. Nel punto di inversione tutta la quantità di moto negativa è compensata. L'afflusso di quantità di

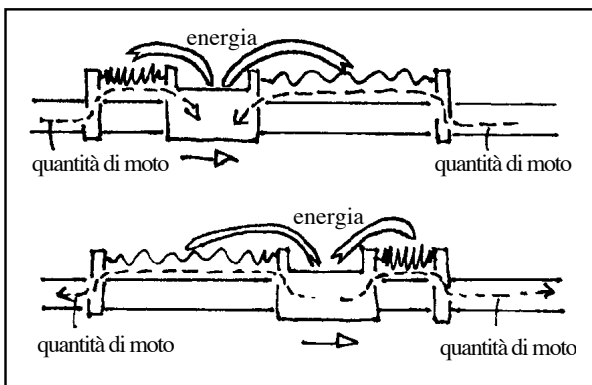


Fig. 5.12. Il percorso della quantità di moto e dell'energia in un oggetto che oscilla.

moto positiva però non si interrompe. Quindi, il sasso si mette in moto in direzione positiva (verso il basso) e la sua quantità di moto (positiva) aumenta durante la caduta. Nell'impatto con il suolo cede nuovamente la quantità di moto alla Terra.

b) L'oggetto oscillante

La slitta in fig. 5.12 si muove avanti e indietro su una rotaia a cuscino d'aria, compie una cosiddetta oscillazione. Avrai già incontrato parecchie volte dei moti di questo tipo. Per la maggior parte di quei processi, i percorsi di energia e impulso sono molto simili a quelli in fig. 5.12. Per questo motivo vogliamo esaminare più da vicino la slitta in fig. 5.12. Spostiamo il corpo un po' sulla sinistra del punto di equilibrio e lo lasciamo andare.

L'energia

Nel momento del rilascio entrambe le molle sono caricate di energia: quella sinistra perché è compressa, quella destra perché è tesa. La slitta si mette in moto verso destra. Così facendo riceve energia da entrambe le molle, visto che entrambe le molle si scaricano. Quando raggiunge il centro, le molle hanno ceduto la loro energia, tutta l'energia è contenuta nel corpo. Il corpo continua verso destra e rallenta, cede di nuovo la sua energia alle molle. Nel punto più a destra tutta l'energia è tornata nelle molle e tutto il processo ricomincia nella direzione opposta.

La quantità di moto

Nel momento del rilascio la molla a sinistra è sottoposta a compressione e quella a destra a trazione. Quindi, nella molla a sinistra fluisce una corrente di quantità di moto verso destra, in quella a destra verso sinistra. In totale ci sono due correnti di quantità di moto che fluiscono da terra nel corpo. La quantità di moto del corpo aumenta finché raggiunge il centro. Ora le molle sono rilassate, la corrente di quantità di moto non fluisce più. Appena la slitta supera il centro, le molle ricominciano a tendersi, però questa volta è la molla a destra a essere sottoposta a compressione e quella a sinistra a trazione. La quantità di moto fluisce nella direzione opposta rispetto a prima: dal corpo in entrambe le direzioni e poi a terra.

Esercizi

1. Un vagone ferroviario urta un respingente a molla. Che percorso seguono energia e quantità di moto?
2. Una palla rimbalza per terra. Che percorso seguono energia e quantità di moto?
3. Un oggetto è appeso al soffitto con una corda elastica in modo da poter oscillare su e giù. Descrivi il percorso di energia e quantità di moto.

6. La quantità di moto come vettore

6.1 I vettori

Fitta nebbia in una zona di traffico navale intenso. L'operatore radio comunica al capitano Amundsen posizione e velocità delle navi nei paraggi della Gigantic: "A una distanza di 5,6 miglia in direzione nordest, una petroliera naviga alla velocità di 35 nodi (65 km/h)." È sufficiente questa indicazione per permettere al capitano Amundsen di evitare la collisione? Naturalmente no, fig. 6.1. "In che direzione naviga?" chiede Amundsen. Sa che se naviga in direzione ovest la situazione si fa pericolosa. In quel caso dovrebbe per forza compiere una manovra per evitare la collisione. Se invece la petroliera naviga verso est, non c'è nessun pericolo.

Per descrivere chiaramente il moto di un corpo (in questo caso la petroliera), si deve fornire:

- la velocità del corpo, per esempio 65 km/h;
- la direzione in cui si muove il corpo, per esempio verso est.

Entrambi i dati appartengono alla velocità. La sola indicazione "65 km/h" non basta per determinare la velocità. La direzione del moto è parte integrante della determinazione di una velocità.

Si dice che la velocità ha un *modulo* e una *direzione*. Nel nostro caso

- modulo della velocità: 65 km/h;
- direzione della velocità: est.

Ci sono altre grandezze che possono essere determinate in modo univoco solo dopo indicazione di modulo e direzione. La quantità di moto è una di queste grandezze.

Entrambe le automobili in fig. 6.2 hanno una quantità di moto di 2000 Hy. Malgrado ciò, le quantità di

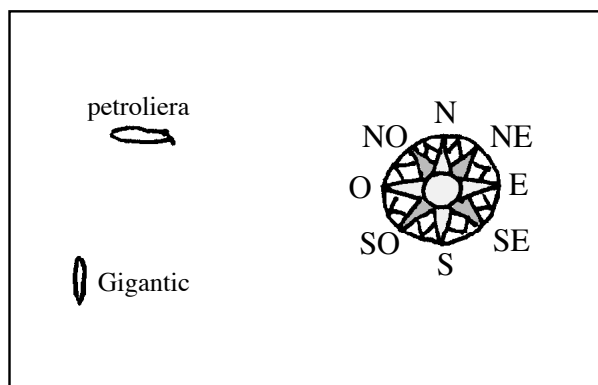


Fig. 6.1. Le posizioni della Gigantic e di una petroliera. La petroliera naviga in direzione est. Non c'è pericolo.

moto non sono uguali. Le auto non si muovono nella stessa direzione. L'auto A viaggia in direzione x , l'auto B perpendicolarmente a x .

È come per la velocità: per definire in modo univoco la quantità di moto di un corpo si devono dare modulo e direzione. Nel nostro caso:

Quantità di moto dell'auto A
modulo: 2000 Hy
direzione: x

Quantità di moto dell'auto B
modulo: 2000 Hy
direzione: perpendicolare a x

Due quantità di moto sono uguali solo a condizione che coincidano sia il modulo che la direzione.

Le grandezze fisiche che sono definite in questo modo vengono dette *vettori*.

Un vettore è definito dal suo modulo e dalla sua direzione.

La velocità e la quantità di moto sono vettori.

Le grandezze fisiche "normali", cioè quelle definite da un solo dato numerico, sono dette *scalari*.

Di una massa è sufficiente dire

$$m = 5 \text{ kg.}$$

Una direzione non avrebbe senso. La massa è quindi uno scalare. Altri esempi di scalari sono l'energia, l'intensità di corrente elettrica e la temperatura.

Come possiamo comunicare a qualcuno il valore di una grandezza vettoriale, come la quantità di moto di un corpo? Per esempio così:

- modulo della quantità di moto: 200 Hy;
- direzione della quantità di moto: 35° rispetto all'asse x .

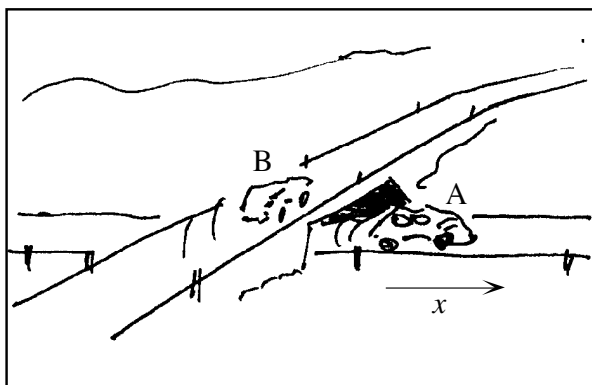


Fig. 6.2. Le quantità di moto delle due auto non sono uguali.

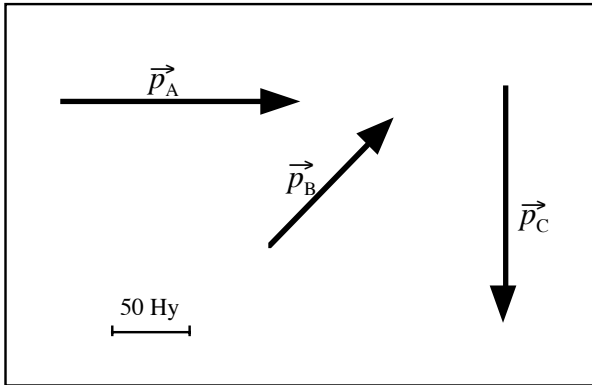


Fig. 6.3. Le quantità di moto dei tre corpi A, B e C nella rappresentazione a frecce.

C'è un modo più pratico per descrivere la quantità di moto (e ogni altro vettore): con un disegno. Prima si stabilisce la scala, per esempio:

1 cm sul disegno corrisponde a 50 Hy.

Ora possiamo rappresentare la quantità di moto con una freccia. La lunghezza della freccia corrisponde al modulo della quantità di moto, la direzione della freccia alla direzione della quantità di moto.

La fig. 6.3 mostra le quantità di moto di tre corpi A, B e C. Tieni presente: 1 cm corrisponde a 50 Hy.

Per facilitarci la vita, diamo dei nomi diversi ai tre tipi di quantità di moto in fig. 6.3: a quella del corpo A diamo il nome quantità di moto a 0° , perché la freccia della quantità di moto descrive un angolo di 0° con l'asse x ; a quella del corpo B quantità di moto a 45° perché la freccia della quantità di moto descrive un angolo di 45° con l'asse x ; a quella del corpo C quantità di moto a 270° .

Anche il simbolo usato serve a indicare se la grandezza è un vettore: sopra la lettera che rappresenta la grandezza si traccia una freccia. Così il simbolo per il vettore velocità è \vec{v} e quello per la quantità di moto è \vec{p} . In fig. 6.3 è stata usata questa scrittura.

Esercizi

1. Rappresenta graficamente le seguenti quantità di moto.

- | | |
|----------|--|
| Corpo P: | modulo: 20 Hy |
| | direzione: 270° rispetto all'asse x |
| Corpo Q: | modulo: 1200 Hy |
| | direzione: 10° rispetto all'asse x |

2. Finora abbiamo sempre considerato solo il moto parallelo a un asse. In questo modo avevamo quantità di moto positiva e negativa. Rappresenta come freccia i valori di quantità di moto $p_1 = 3,5 \text{ Hy}$ e $p_2 = -4,5 \text{ Hy}$.

3. Come sono modulo e direzione delle quantità di moto rappresentate dalle frecce in fig. 6.4?

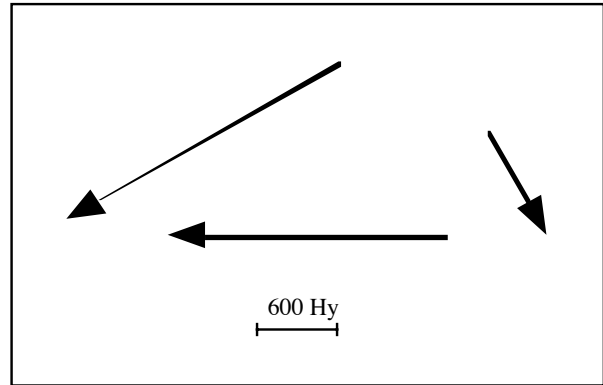


Fig. 6.4. Per l'esercizio 3

6.2 La direzione della corrente e la direzione di ciò che scorre

Qualcuno è in piedi in riva a uno stagno e tenta di muovere una zattera con l'aiuto di una lunga stanga. Le figg. da 6.5a a 6.5c mostrano tre diverse scene viste dall'alto. Vogliamo descrivere cosa succede.

Per facilitare l'esercizio abbiamo indicato la direzione x . Diamo sempre la quantità di moto rispetto a questa direzione.

In fig. 6.5a la zattera è spinta verso destra dalla persona, quindi nella direzione positiva dell'asse x . Poniamo che la persona prema in modo che ogni secondo attraverso la stanga fluiscono 150 Hy. L'intensità della corrente di quantità di moto è quindi di $150 \text{ Hy/s} = 150 \text{ N}$. In fig. 6.5b, la persona spinge la zattera lontano da sé, verso il centro dello stagno. Spinge nuovamente in modo che ogni secondo alla zattera giungano 150 Hy. Anche in fig. 6.5c preme con 150 N, ma questa volta di sbieco dalla destra.

Anche se nei tre casi ogni secondo fluisce lo stesso numero di huygens, le tre correnti di quantità di moto differiscono tra loro visto che non fluisce la stessa cosa.

Nel primo caso la zattera riceve quantità di moto a 0° . Quindi nella stanga è fluita quantità di moto a 0° . Nel secondo caso la zattera riceve quantità di moto a 90° . Perciò attraverso la stanga deve fluire quantità di moto a 90° . Nel terzo caso nella stanga fluisce quantità di moto a 45° .

La quantità di moto che fluisce dalla persona alla zattera è rappresentata dalle frecce disegnate a sinistra della stanga. Puoi immaginarti ogni freccia come una porzione di quantità di moto che si muove dalla persona alla zattera.

La lunga linea tratteggiata rappresenta il percorso seguito dalla quantità di moto.

Come puoi vedere: con l'intensità della corrente di quantità di moto ci troviamo nella stessa situazione che con la quantità di moto stessa. Un solo valore numerico non è sufficiente alla determinazione.

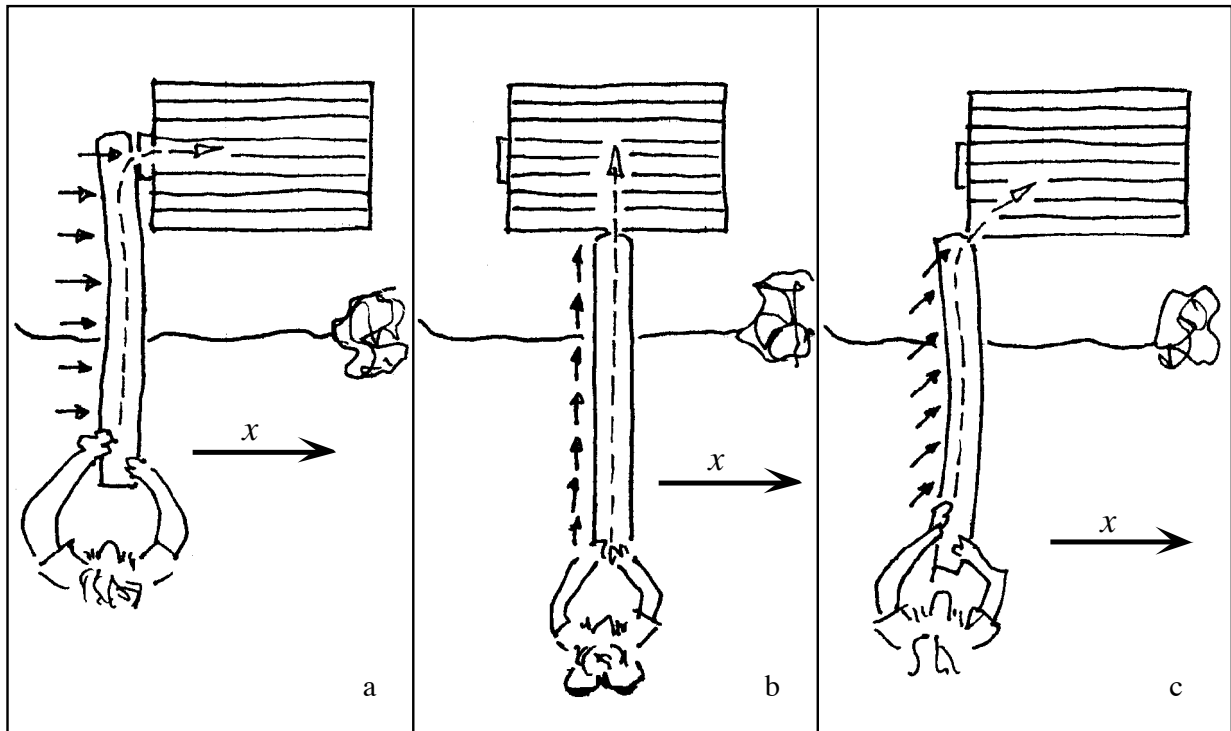


Fig. 6.5. Alla zattera, cioè dal basso verso l'alto, attraverso la stanga fluisce: (a) quantità di moto a 0° , (b) quantità di moto a 90° , (c) quantità di moto a 45° .

L'intensità della corrente è determinata, se oltre al modulo (qui 150 N) diamo anche la direzione della quantità di moto che fluisce (0° , 90° oppure 45°). Quindi:

L'intensità della corrente di quantità di moto è un vettore.

Come ogni altro vettore, possiamo rappresentare con una freccia anche questo. In questo caso vale:

lunghezza della freccia: modulo dell'intensità della corrente di quantità di moto;

direzione della freccia: direzione della quantità di moto che fluisce nel conduttore.

Come simbolo per il vettore intensità di corrente usiamo \vec{F} .

La fig. 6.6 mostra i vettori intensità di corrente corrispondenti alle figg. 6.5a-c.

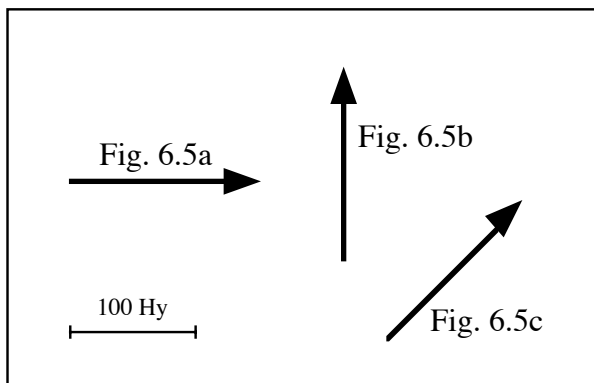


Fig. 6.6. Vettori intensità di corrente per le quantità di moto che fluiscono alla zattera nelle figg. 6.5a-c.

Confrontiamo ora la fig. 6.7 con la fig. 6.5c. Anche in fig. 6.7 nella zattera fluisce quantità di moto a 45° - a differenza della fig. 6.5c però non attraverso una stanga dritta ma una ricurva. La quantità di moto deve fluire attraverso una doppia curva. Quindi: in entrambe le figure fluisce la stessa quantità di moto e in entrambe le figure fluiscono 150 Hy/s. Ma la quantità di moto fluisce una volta attraverso un conduttore dritto e una volta attraverso un ricurvo. Le frecce che indicano i vettori corrispondenti alle figg. 6.5c e 6.7 sono però uguali.

Il percorso seguito dalla quantità di moto nelle figg. 6.5c e 6.7 è rappresentato da una linea tratteggiata.

Non confondere la direzione del percorso con la direzione della quantità di moto trasportata.

Abbiamo descritto i tre processi nelle figure da 6.5a a 6.5c, dicendo che tipo di quantità di moto e quanta ne è fluita, da terra *alla zattera*. Però possiamo anche descrivere i processi dicendo che tipo di quantità di moto e quanta ne è fluita dalla zattera, cioè *a terra*. Le due descrizioni sono equivalenti.

"Da terra fluiscono alla zattera x huygens al secondo di quantità di moto di una certa direzione" ha lo stesso significato di "dalla zattera fluiscono a terra x huygens al secondo di quantità di moto della direzione opposta".

La fig. 6.8 mostra lo stesso processo della fig. 6.5a ma la descrizione è diversa. La fig. 6.8 non mostra la quantità di moto che fluisce alla zattera, ma la quantità di moto che fluisce a terra, cioè quantità di moto a 180° .

Nota che la freccia vettore dell'intensità di corrente, nelle due descrizioni deve avere direzione opposta.

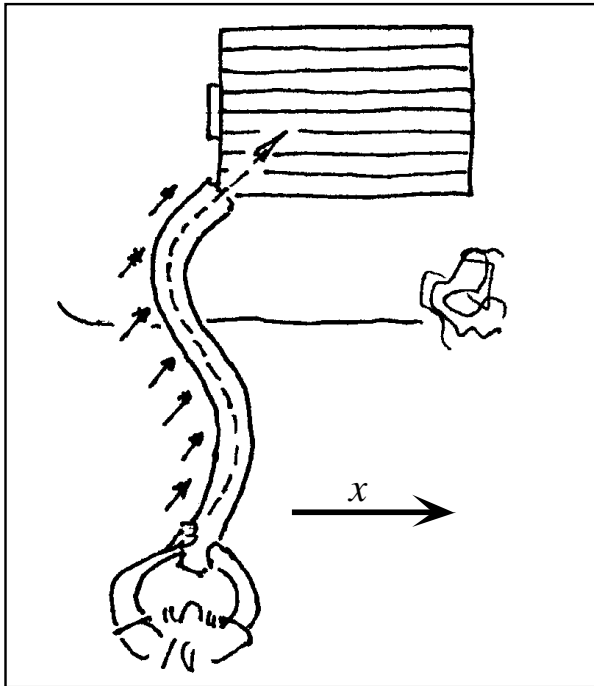


Fig. 6.7. Nella zattera fluisce quantità di moto a 45° attraverso una stanga ricurva.

Le seguenti affermazioni sono quindi equivalenti:

- da terra fluiscono alla zattera 150 Hy/s di quantità di moto a 0° ;
- dalla zattera fluiscono a terra 150 Hy/s di quantità di moto a 180° .

Esercizi

1. Nella sbarra fra trattore e rimorchio fluisce una corrente di quantità di moto di 300 N, fig. 6.9. Che tipo di quantità di moto fluisce *al rimorchio*? Rappresenta l'intensità della corrente di quantità di moto con una freccia vettore. Descrivi lo stesso processo indicando quanta e che tipo di quantità di moto fluisce *dal rimorchio* attraverso la sbarra.

2. Qualcuno spinge un carrello in direzione x positiva con l'aiuto di un sbarra a forma di spirale, fig. 6.10. Fluisce una corrente di quantità di moto di 25 N.

- a) Che tipo di quantità di moto fluisce nel carrello?
- b) Segna il percorso seguito dalla quantità di moto.
- c) Disegna la freccia vettore dell'intensità di corrente.

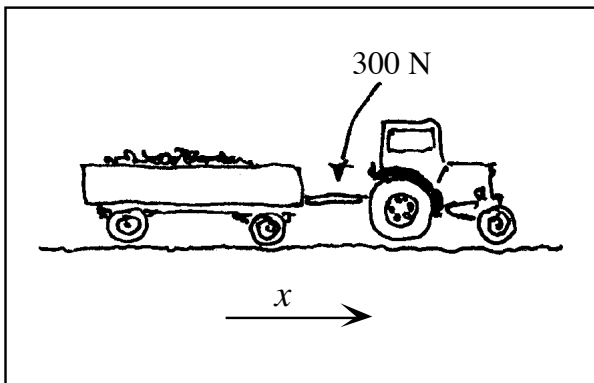


Fig. 6.9. Per l'esercizio 1

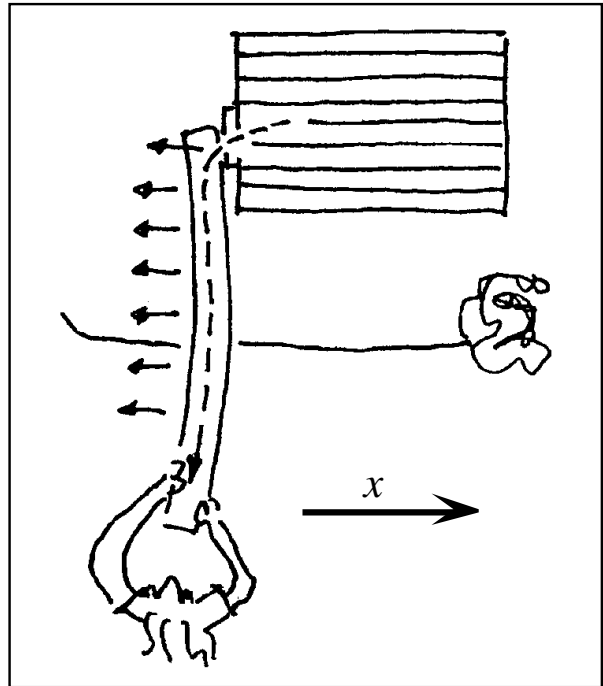


Fig. 6.8. Lo stesso processo di fig. 6.5a descritto in modo diverso: a terra fluisce quantità di moto a 180° .

3. Una mela cade dall'albero, fig. 6.11. Nella mela fluisce quantità di moto. (Proviene dalla Terra attraverso il campo gravitazionale.) La mela pesa 300 g.

- a) Qual è l'intensità della corrente di quantità di moto?
- b) Che tipo di quantità di moto fluisce nella mela? (Espresso con un angolo in un piano verticale).
- c) Disegna la freccia vettore dell'intensità della corrente di quantità di moto.

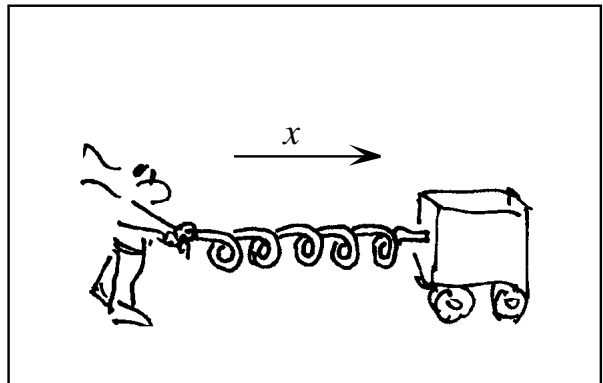


Fig. 6.10. Per l'esercizio 2

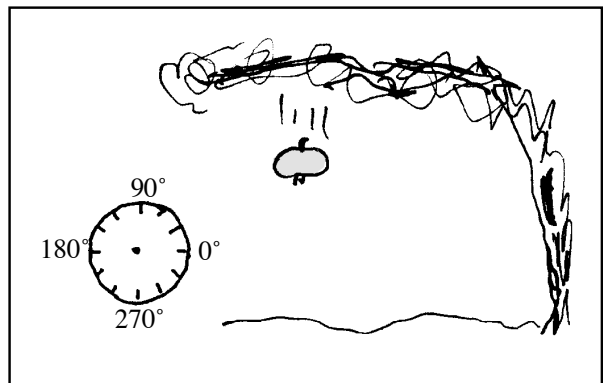


Fig. 6.11. Per l'esercizio 3

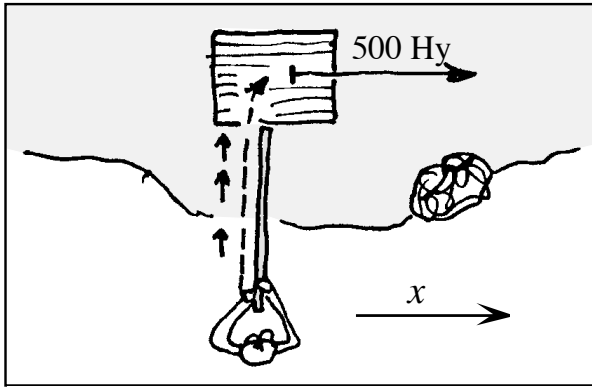


Fig. 6.12. La zattera ha 500 Hy di quantità di moto a 0° e riceve 150 Hy di quantità di moto a 90° .

6.3 L'addizione di vettori

Ancora lo stagno con la zattera, fig. 6.12. La zattera si muove verso destra. Detto fisicamente: ha quantità di moto a 0° - poniamo 500 Hy. La persona spinge la zattera, nella figura dal basso verso l'alto. Spinge in modo che nella zattera fluiscono, ogni secondo, 50 huygens di quantità di moto a 90° . Spinge per tre secondi. Che quantità di moto ha la zattera alla fine?

Ha 500 Hy di quantità di moto a 0° e $3 \cdot 50$ Hy di quantità di moto a 90° . S, ma quant'è in totale? E che tipo di quantità di moto è?

Puoi immaginarti che alla fine la zattera non si muoverà né parallela né perpendicolare alla direzione x , ma si muoverà un po' di sghembo, verso l'alto e la destra della figura. La quantità di moto totale alla fine, non è quindi quantità di moto a 0° ma nemmeno quantità di moto a 90° .

Il problema della quantità di moto totale può essere formulato anche così: come si sommano i vettori? Come addizioniamo 500 Hy di quantità di moto a 0° e 150 Hy di quantità di moto a 90° ?

Se utilizziamo le frecce per rappresentare i vettori quantità di moto, il risultato è facile da trovare.

Rappresentiamo ognuna delle due quantità di moto con la sua freccia, fig. 6.13a. Chiamiamo le due frecce \vec{p}_1 e \vec{p}_2 . Ora le colleghiamo in modo tale che l'inizio di \vec{p}_2 coincida con la punta di \vec{p}_1 , fig. 6.13b.

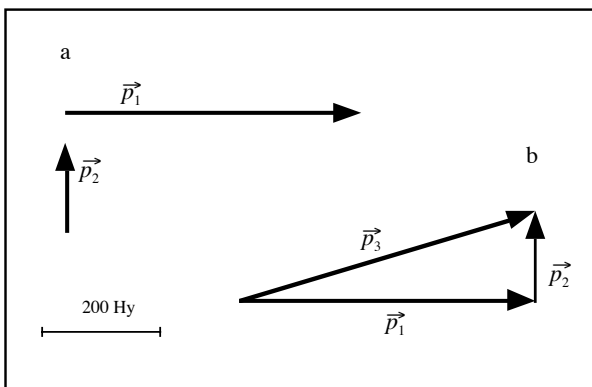


Fig. 6.13. Addizione vettoriale

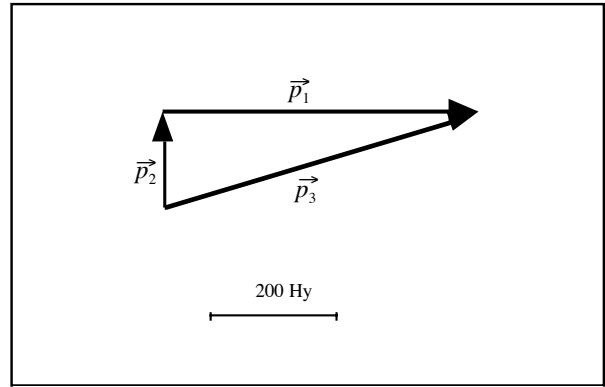


Fig. 6.14. L'addizione vettoriale è commutativa.

Poi disegniamo una terza freccia \vec{p}_3 , il cui inizio coincide con l'inizio di \vec{p}_1 e la cui punta coincide con la punta di \vec{p}_2 . La freccia \vec{p}_3 rappresenta la quantità di moto totale cercata.

Ciò che abbiamo fatto si chiama *addizione vettoriale*. Simbolicamente è descritta da

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_3$$

Invece di appendere \vec{p}_2 a \vec{p}_1 possiamo anche appendere \vec{p}_1 a \vec{p}_2 , fig. 6.14. Otteniamo lo stesso risultato. Quindi la somma vettoriale è commutativa, come la normale addizione.

Esempio

Un sasso di 0,5 kg viene lanciato orizzontalmente, fig. 6.15. Subito dopo il lancio ha 3 Hy di quantità di moto a 0° . A causa della gravità, riceve continuamente dalla Terra nuova quantità di moto. Si tratta di quantità di moto a 270° . Quanta e che tipo di quantità di moto ha dopo 2 secondi?

Calcoliamo l'intensità della corrente di quantità di moto che arriva dalla Terra

$$F = m \cdot g = 0,5 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg} = 5 \text{ N}$$

Quindi il sasso riceve dalla Terra 5 Hy ogni secondo. La quantità di moto ricevuta dalla Terra in 2

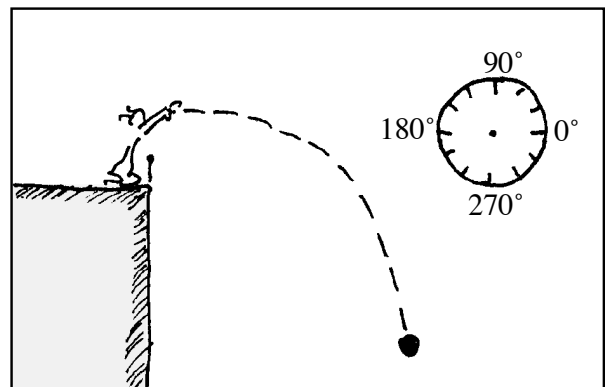


Fig. 6.15. All'inizio il sasso ha solo quantità di moto a 0° . Attraverso il campo gravitazionale riceve in continuazione quantità di moto a 270° .

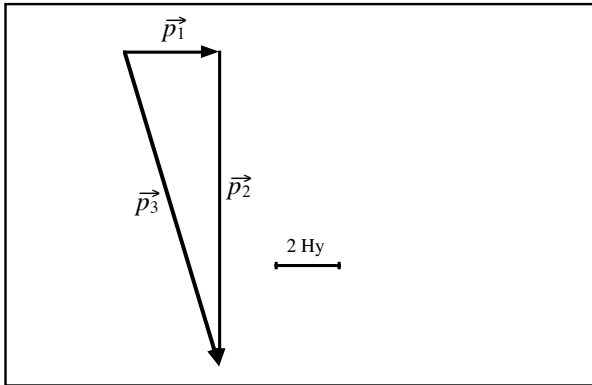


Fig. 6.16. Freccie vettore per il lancio di fig. 6.15.

secondi ammonta a:

$$p = F \cdot t = 5 \text{ Hy/s} \cdot 2 \text{ s} = 10 \text{ Hy}$$

Ora dobbiamo sommare

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_3$$

dove

$$\vec{p}_1 : 3 \text{ Hy di quantità di moto a } 0^\circ$$

$$\vec{p}_2 : 10 \text{ Hy di quantità di moto a } 270^\circ$$

La fig. 6.16 mostra il risultato. Il modulo della quantità di moto totale si può calcolare grazie al teorema di Pitagora:

$$\begin{aligned} \text{modulo di } \vec{p}_3 &= \sqrt{(3 \text{ Hy})^2 + (10 \text{ Hy})^2} \\ &= \sqrt{9 + 100} \text{ Hy} \\ &= 10,44 \text{ Hy} \end{aligned}$$

Esempio

Due persone trainano una barca in un canale. Una persona cammina su una riva, l'altra sull'altra, fig. 6.17. Le corde e il canale descrivono un angolo di 30° . (Più precisamente: la corda in alto nel disegno descrive un angolo di 30° , quella in basso di 330° .) In ogni corda fluisce una corrente di quantità di

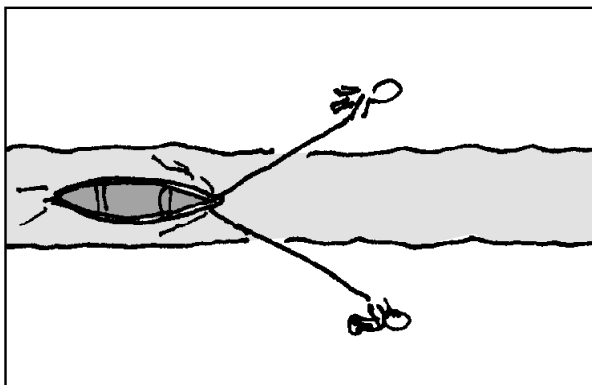
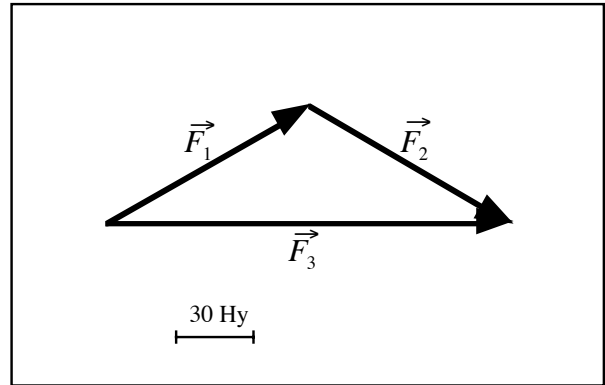
Fig. 6.17. La barca riceve quantità di moto a 30° da una persona e quantità di moto a 330° dall'altra.

Fig. 6.18. Freccie vettore delle intensità delle correnti, per la fig. 6.17.

moto il cui modulo è 90 N . Che quantità di moto al secondo riceve la barca? Di che quantità di moto si tratta?

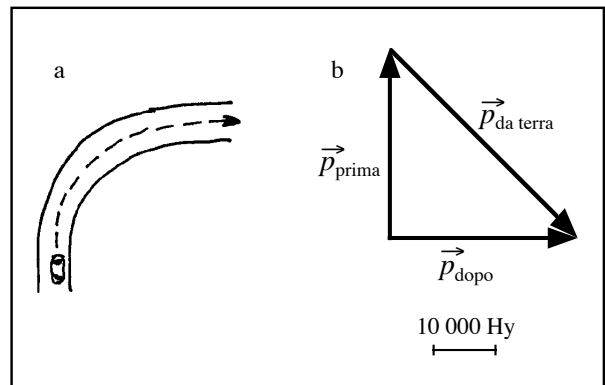
Nella corda in alto fluiscono alla barca 90 N di quantità di moto a 30° , dalla corda in basso 90 N di quantità di moto a 330° . In fig. 6.18 le due frecce delle intensità di corrente sono state composte. L'intensità totale della corrente che entra nella barca, è la somma vettoriale. Dal disegno apprendiamo:

Intensità totale: 156 N di quantità di moto a 0°

Esempio

Un'auto curva di 90° , fig. 6.19a. La sua quantità di moto, prima e dopo la curva ha lo stesso modulo, cioè $30\,000 \text{ Hy}$. Durante la curva l'auto riceve quantità di moto da terra. Inoltre vale: quantità di moto iniziale dell'auto + quantità di moto da terra = quantità di moto finale dell'auto. Naturalmente il segno "+" significa somma vettoriale.

La fig. 6.19b mostra come si costruisce la freccia vettore della quantità di moto ricevuta da terra. La direzione di questa quantità di moto è la direzione della bisettrice dell'angolo formato dai due tratti rettilinei di strada. Il modulo della quantità di moto che da terra va all'auto si calcola con il teorema di Pitagora ottenendo circa $42\,000 \text{ Hy}$.

Fig. 6.19. (a) Un'auto curva di 90° . (b) Costruzione della freccia vettore della quantità di moto che l'auto riceve da terra.

Esercizi

1. Un sasso di 100 g viene lanciato orizzontalmente dall'alto di una torre. La sua quantità di moto iniziale è 0,5 Hy.

a) Quanta e che tipo di quantità di moto riceve dalla Terra entro un secondo?

b) Costruisci la freccia vettore della quantità di moto del sasso un secondo dopo il lancio.

c) Qual è il modulo della quantità di moto del sasso un secondo dopo il lancio?

2. Un sasso di 0,3 kg viene lanciato orizzontalmente dall'alto di una torre. La sua velocità iniziale è 5 m/s.

a) Qual è la sua quantità di moto iniziale?

b) A un certo punto l'angolo di caduta del sasso è esattamente di 45° . Che quantità di moto ha ricevuto dalla Terra il sasso fino a quel momento? Costruisci un diagramma a frecce per i vettori. Qual è il modulo della quantità di moto in quell'istante?

3. Una sfera pesante 3 kg viene lanciata in alto a un angolo di 45° rispetto all'orizzontale. Ha una quantità di moto iniziale di 12 Hy. Dopo quanto tempo cadrà a un angolo di 45° verso il basso?

4. Un treno imbocca una curva di 30° . Viaggia a 70 km/h e ha una massa di 1200 t. Costruisci la freccia vettore della quantità di moto che il treno riceve da terra.

5. Un'auto percorre una curva di 90° . La sua velocità prima della curva è 30 km/h, dopo è 50 km/h. La sua massa è 1400 kg. Costruisci la freccia vettore della quantità di moto che l'auto riceve durante la curva. Qual è il modulo di questa quantità di moto?

6. Il portiere rilancia la palla in campo. Un giocatore la calcia immediatamente verso la porta. Descrivi a parole da dove la palla riceve quantità di moto lungo il percorso e a chi la cede. Tieni conto anche della resistenza dell'aria.

6.4 Satelliti, Luna e pianeti

Abbiamo visto: un oggetto nei pressi della superficie terrestre riceve quantità di moto a 270° . Se lo lasciamo andare la sua quantità di moto a 270° aumenta e l'oggetto si mette in moto - verso la Terra.

Ma un oggetto cade per terra anche se, invece di essere semplicemente lasciato cadere, viene lanciato orizzontalmente, fig. 6.15.

Immaginiamo di lanciare un oggetto da una montagna molto alta e in modo che abbia moltissima quantità di moto a 0° . La fig. 6.20 mostra le traiettorie per tre diversi valori iniziali della quantità di moto a 0° .

Il corpo vola così lontano da percepire la curvatura della superficie terrestre. In questo modo succede qualcosa di sorprendente: nei pressi del punto di lancio il corpo riceve quantità di moto a 270° . Durante il volo però, la direzione della nuova quantità di moto ricevuta cambia. Così, alla fine della sua traiettoria il corpo in fig. 6.20 non riceve più quantità di moto a 270° ma quantità di moto a 240° .

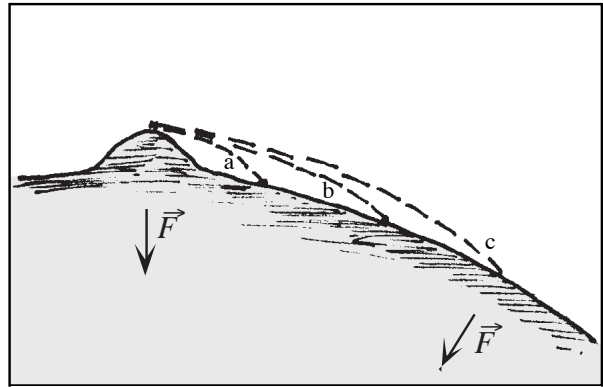


Fig. 6.20. Un oggetto viene lanciato dalla cima di una montagna molto alta. Le tre traiettorie corrispondono a tre diversi valori iniziali di quantità di moto.

Se riusciamo a dare alla quantità di moto iniziale un valore elevato e appropriato, allora ci si presenta la situazione di fig. 6.21. Il corpo continua a cadere e ciononostante non si avvicina alla Terra.

Nel punto A riceve quantità di moto a 270° , in B quantità di moto a 225° , in C quantità di moto a 180° , in D quantità di moto a 90° , in E quantità di moto a 0° , ecc. La quantità di moto che affluisce fa in modo che la traiettoria del corpo sia continuamente piegata verso la Terra. Se si sceglie bene la quantità di moto iniziale il corpo descrive una traiettoria circolare.

La direzione della quantità di moto che il corpo riceve in ogni istante è sempre perpendicolare alla direzione della quantità di moto che ha in quell'istante. Così in B il corpo ha quantità di moto a 315° e riceve quantità di moto a 225° . In C ha quantità di moto a 270° e riceve quantità di moto a 180° , ecc.

Avrai notato che non abbiamo discusso un "esperimento mentale" (o Gedankenexperiment) completamente folle e non realistico.

Quando si dice che un satellite è posto in "orbita" si intende:

- che viene portato a una determinata altezza;
- che gli viene data esattamente la quantità di moto necessaria affinché abbia un'orbita circolare.

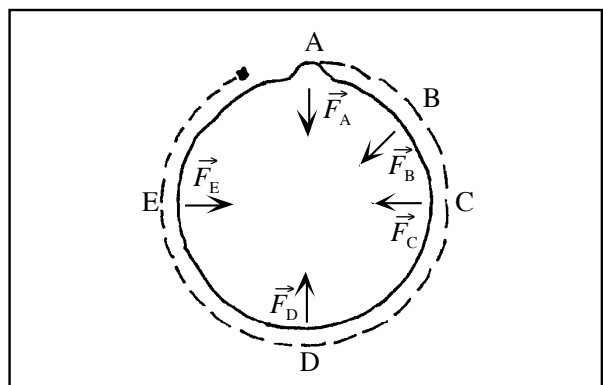


Fig. 6.21. La direzione della quantità di moto che affluisce dalla Terra è perpendicolare alla direzione della quantità di moto che il corpo ha in quell'istante.

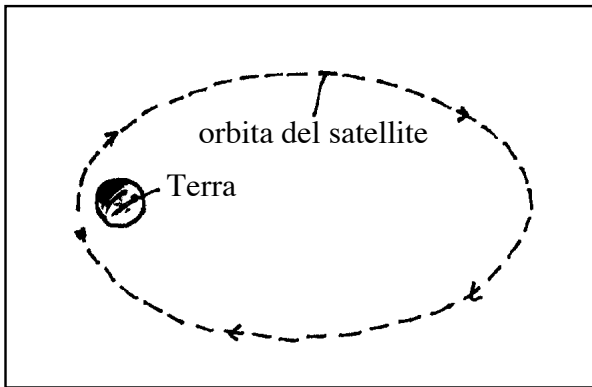


Fig. 6.22. Se la quantità di moto iniziale è maggiore di quella necessaria per un'orbita circolare, il satellite si muove su un'orbita ellittica.

Se al satellite non viene data una quantità di moto sufficiente ricade sulla Terra - come il corpo in fig. 6.20. Se gli diamo un po' più della quantità di moto necessaria per l'orbita circolare, inizialmente si allontana: percorre un'orbita ellittica, fig. 6.22.

Solamente per valori iniziali di quantità di moto molto più elevati si riesce a fare in modo che voli via del tutto dalla Terra. In quel caso non è più un satellite ma diventa una *sonda spaziale*. (Una sonda spaziale di grande successo è stata Voyager 2. Dopo un viaggio durato circa dieci anni ha lasciato il sistema solare.)

Il moto dei satelliti non è però una scoperta umana. Esisteva già in natura molto prima che esistessero gli uomini. Il moto attorno alla Terra del suo satellite naturale, la Luna, è lo stesso tipo di moto di un satellite artificiale. Solo che la Luna gira a una distanza nettamente più grande. Mentre i satelliti artificiali orbitano a un'altezza tra i 200 km e i 40 000 km sopra la superficie terrestre, la distanza della Luna dalla Terra è di quasi 400 000 km.

Probabilmente saprai che oltre alla Terra anche altri pianeti hanno delle lune.

Da ultimo, anche il moto della Terra e degli altri pianeti attorno al Sole è un moto del tipo che hai appena conosciuto. La Terra (come gli altri pianeti) riceve costantemente quantità di moto dal Sole. La direzione della quantità di moto ricevuta in ogni istante è perpendicolare alla direzione della quantità di moto che ha già.

6.5 Ruote

Quando ci siamo occupati di conduttori e non conduttori di quantità di moto, non sapevamo ancora che la quantità di moto è un vettore. Allora conoscevamo solo quantità di moto di un tipo e consideravamo il moto in una sola direzione. Tra le altre cose avevamo trovato la seguente regola: le ruote fungono da isolamento per la quantità di moto.

Questa regola diventa più complicata se lasciamo fluire quantità di moto di diverse direzioni.

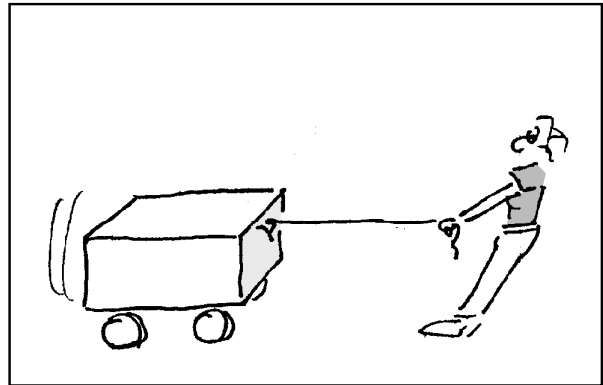


Fig. 6.23. Il carrello è isolato da terra grazie alle ruote. La quantità di moto che riceve dalla persona non può defluire e quindi si accumula nel carrello.

La fig. 6.23 mostra ancora una volta come ci si può convincere che le ruote impediscono alla quantità di moto di fluire a terra. La persona tira, attraverso la corda nel carrello fluisce quantità di moto. Visto che la quantità di moto non può defluire a terra attraverso le ruote, si accumula e il carrello diventa più veloce.

Anche in fig. 6.24 una persona tira un carrello. Malgrado le ruote però, la quantità di moto non resta nel carrello. Defluisce e il carrello non si muove. La differenza dalla fig. 6.23: la quantità di moto che fluisce nel carrello è perpendicolare alle ruote. Quindi:

Le ruote lasciano defluire a terra la quantità di moto trasversale. Quella longitudinale invece non viene lasciata passare.

Abbiamo forzato un po' la mano e dipinto la situazione in bianco e nero. Da un lato a causa dell'attrito defluisce anche una piccola parte di quantità di moto longitudinale. Dall'altro, fig. 6.25, tirando con forza (cioè con una corrente di quantità di moto molto intensa) il collegamento conduttore di quantità di moto trasversale in fig. 6.24 si può rompere.

L'auto che percorre una curva in fig. 6.26 deve liberarsi della sua quantità di moto a 0° . Ciò succede perché le ruote lasciano defluire a terra la quantità di moto trasversale. A parte sul ghiaccio. In quel caso le ruote non conducono quantità di moto in nessuna

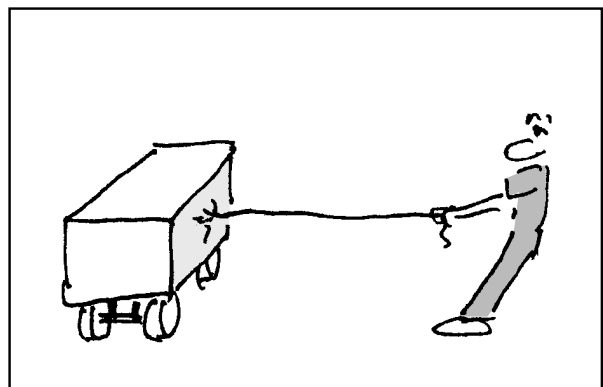


Fig. 6.24. La quantità di moto che riceve dalla persona defluisce a terra. La quantità di moto trasversale non viene trattenuta dalle ruote.

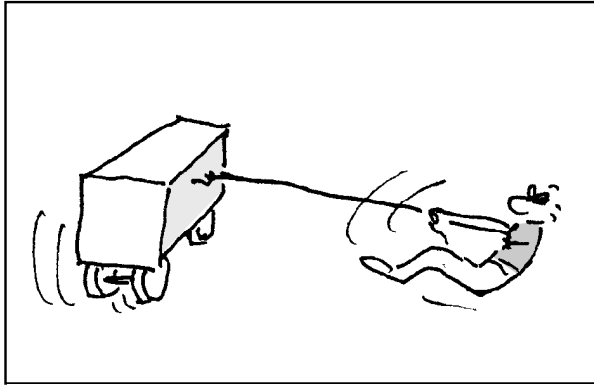


Fig. 6.25. Se la corrente di quantità di moto diventa troppo intensa, il collegamento conduttore si rompe.

direzione. Per questo motivo sono più sicuri i mezzi di trasporto che si muovono su rotaia, dove le ruote sono sempre dei buoni conduttori di quantità di moto trasversale.

Per una nave la distinzione è più sfumata. La quantità di moto longitudinale defluisce all'acqua in misura minore della quantità di moto trasversale, ma la differenza è molto meno marcata che per i veicoli sulla terra ferma.

A volte si desidera che un veicolo non perda né quantità di moto trasversale né longitudinale. Un metodo per ottenere questo risultato: montiamo le ruote in modo che possano cambiare direzione. Probabilmente anche i carrelli che usate per spostare gli apparecchi nel laboratorio di fisica hanno delle ruote di questo tipo, fig. 6.27.

Abbiamo finito con le ruote? Non del tutto, abbiamo considerato solo il moto nel piano in cui si muove il carrello. Manca ancora la terza direzione.

Prendi un carrellino e premilo dall'alto sul tavolo. Ovviamente non si muove. Tiralo perpendicolarmente verso l'alto. Si muove verso l'alto. Ora invece che sul tavolo fai la stessa cosa contro la parete. Se premiamo il carrellino contro la parete non si muove, la quantità di moto defluisce, fig. 6.28. Se tiri il carrellino si muove staccandosi dalla parete, la quantità di moto non defluisce. Tra l'altro in questo caso le ruote sono del tutto superflue.

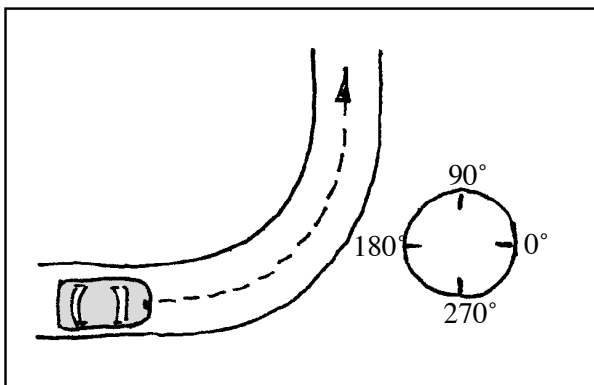


Fig. 6.26. L'auto deve liberarsi della sua quantità di moto a 0° . Durante la curva deve ricevere da terra quantità di moto a 90° .

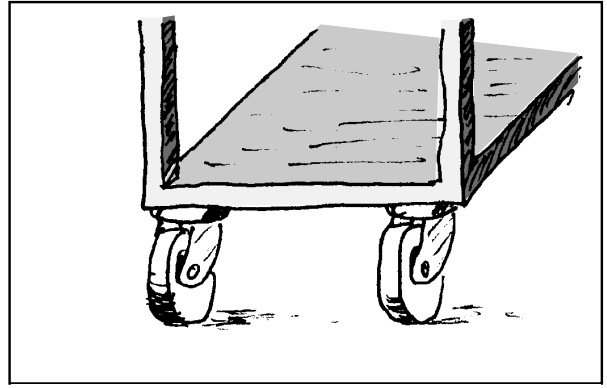


Fig. 6.27. Le ruote sono orientabili. Non lasciano passare né quantità di moto longitudinale né trasversale.

Esempio

Un carrello di 20 kg è fermo su una strada ripida, il freno viene disinserito, fig. 6.29. Cosa fa il carrello? Attraverso il campo gravitazionale nel carrello fluisce continuamente quantità di moto a 270° . Il modulo dell'intensità della corrente di quantità di moto è

$$F = m \cdot g = 20 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg} = 200 \text{ N}$$

Cosa succede a questa quantità di moto? Defluisce a terra? Si accumula?

Non sappiamo cosa succede alla quantità di moto a 270° ma sappiamo cosa succede alla quantità di moto parallela alla strada e alla quantità di moto perpendicolare alla strada.

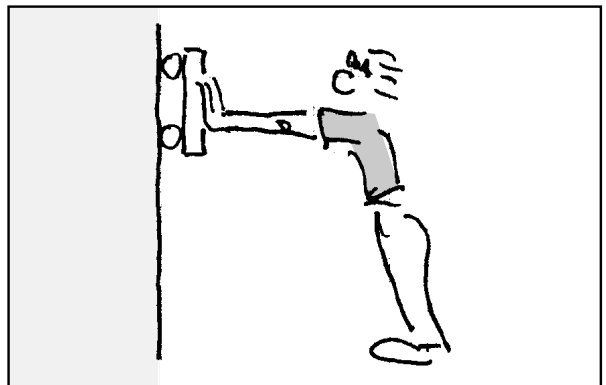


Fig. 6.28. La quantità di moto di direzione perpendicolare al piano d'appoggio del carrello, viene condotta alla parete.

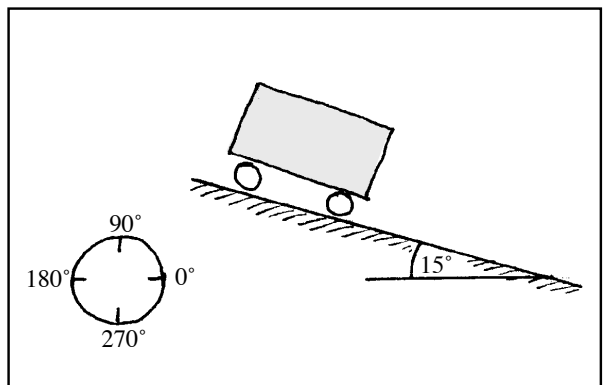


Fig. 6.29. Nel carrello entra quantità di moto a 270° . Viene scomposta in una parte che defluisce a terra e in una parte che si accumula nel carrello.

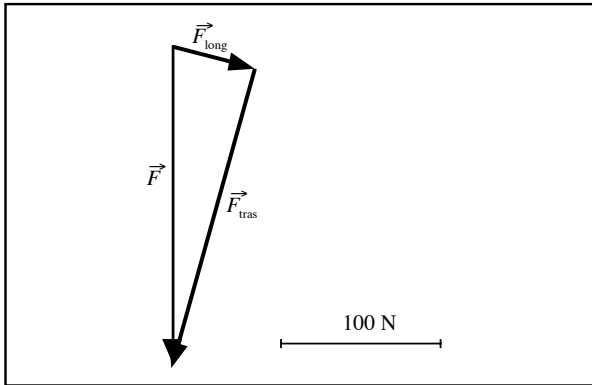


Fig. 6.30. Scomposizione del vettore intensità di corrente della quantità di moto a 270° in una componente a 255° e in una componente a 345° .

La quantità di moto nella direzione di moto del carrello è quantità di moto a 345° . Non può defluire e quindi si accumula nel carrello.

La quantità di moto perpendicolare è quantità di moto a 255° . Defluisce a terra totalmente.

Quindi quello che dobbiamo fare è: scomporre la corrente di quantità di moto a 270° \vec{F} che affluisce in una corrente di quantità di moto a 345° \vec{F}_{long} e una corrente di quantità di moto a 255° \vec{F}_{tras} , fig. 6.30.

Dalla figura otteniamo

$$F_{\text{long}} = 50 \text{ N}$$

$$F_{\text{tras}} = 190 \text{ N}$$

Quindi: ogni secondo defluiscono a terra 190 Hy e la quantità di moto del carrello aumenta di 50 Hy.

Esercizi

1. Un'impugnatura cilindrica C può scivolare avanti e indietro senza attrito su una sbarra S, fig. 6.31a. A quale tipo di quantità di moto è permeabile il collegamento tra sbarra e impugnatura, a quale è impermeabile?

2. Il cilindro C_1 può scivolare liberamente sulla sbarra S, i cilindri C_2 e C_3 fanno lo stesso sul telaio T. A quale tipo di quantità di moto è permeabile il collegamento tra C_1 e il telaio, a quale è impermeabile?

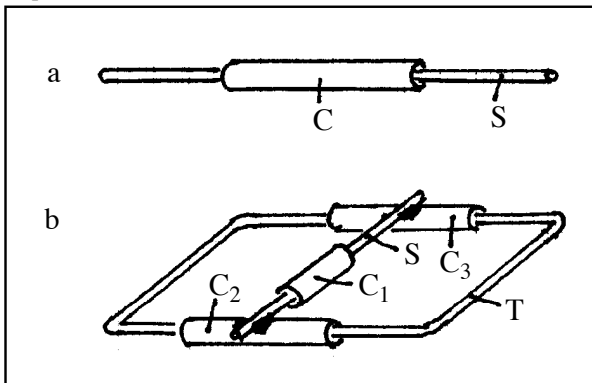


Fig. 6.31. (a) Per l'esercizio 1. (b) Per l'esercizio 2

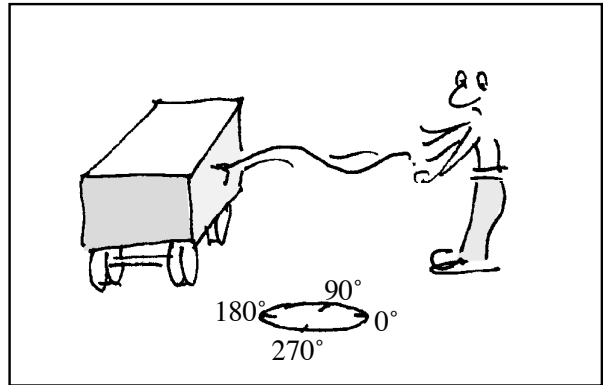


Fig. 6.32. Qualcuno, con una corda, cerca di muovere lateralmente un carrello.

6.6 Corde

Un'altra vecchia regola che va completata: le corde conducono la quantità di moto solo in una direzione.

Quello che succede in fig. 6.32 non è facile da capire: la persona cerca di mettere in moto lateralmente il carrello con una corda - ovviamente senza successo. In termini di quantità di moto: cerca di trasmettere quantità di moto a 90° con una corda in direzione 0° . E questo non si può fare. Le corde sono selettive:

Attraverso una corda si può spedire unicamente quantità di moto parallela alla corda e solo in una direzione.

Vogliamo applicare la nuova formulazione della regola. La fig. 6.33 mostra, visto dall'alto, un carrello tirato con una corda. Non viene tirato dal davanti ma un po' di lato. Nella corda fluisce una corrente di quantità di moto di 40 N. Di quanti Hy al secondo cambia la quantità di moto del carrello? Qual è la quantità di moto che defluisce a terra?

La quantità di moto che fluisce nella corda deve avere la stessa direzione della corda. Chiamiamo \vec{F} il corrispondente vettore intensità di corrente, fig. 6.34. Scomponiamo questa corrente in due componenti:

- una componente \vec{F}_{tras} perpendicolare alla direzione del carrello e che defluisce a terra;

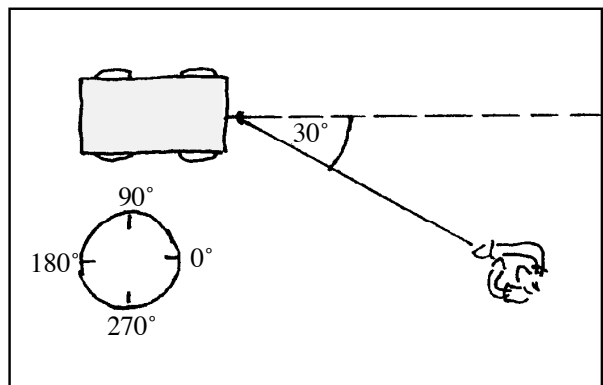


Fig. 6.33. Carrello con corda, visti dall'alto. La corda viene tirata. La quantità di moto a 0° del carrello aumenta.

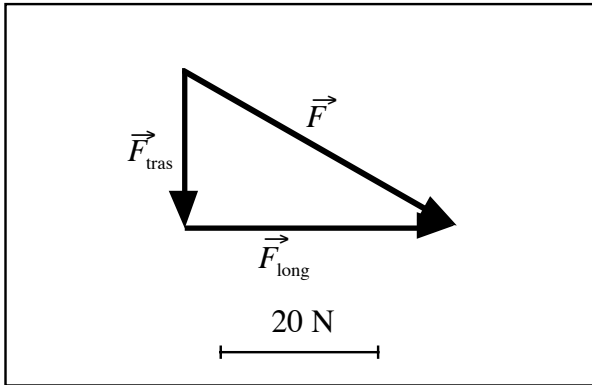


Fig. 6.34. Il vettore intensità di corrente della quantità di moto della corda, viene scomposto in una componente longitudinale e una componente trasversale.

- una componente \vec{F}_{long} nella stessa direzione del carrello, che causa l'aumento di quantità di moto del carrello.

Dal disegno leggiamo:

$$F_{\text{tras}} = 20 \text{ N}$$

$$F_{\text{long}} = 34 \text{ N.}$$

Quindi, ogni secondo defluiscono a terra 20 Hy di quantità di moto trasversale e la quantità di moto longitudinale del carrello aumenta di 34 Hy.

Esercizi

1. Un'auto giocattolo viene tirata con una corda su un pavimento orizzontale. La corda è inclinata verso l'alto, fig. 6.35. Nella corda fluisce una corrente di quantità di moto di 20 N. Quanti N contribuiscono a far muovere in avanti l'auto?
2. Un'auto ne traina un'altra. Le auto viaggiano nella stessa direzione ma sono sfasate lateralmente di 1 m, fig. 6.36. La corda di traino è lunga 3 m. Attraverso la corda fluisce una corrente di quantità di moto di 500 N. Che corrente di quantità di moto contribuisce al moto dell'auto trainata?

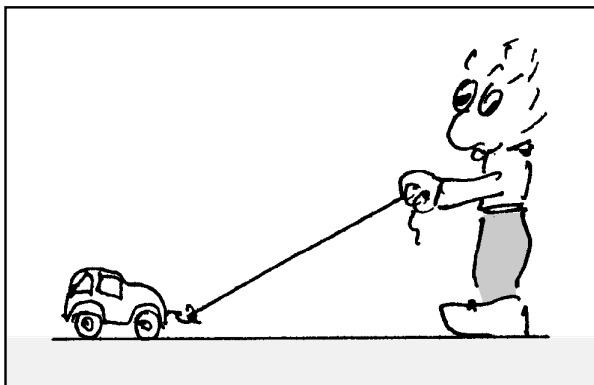


Fig. 6.35. Per l'esercizio 1

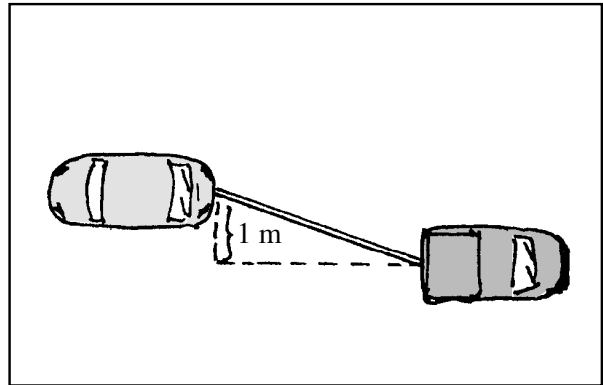


Fig. 6.36. Per l'esercizio 2

6.7 La regola dei nodi per le correnti di quantità di moto

Un lampione è appeso con due corde ai muri di due case, fig. 6.37. La sua massa è 3,5 kg. Che carico sopportano i ganci sui muri?

Spero avrai capito che cerchiamo i vettori delle intensità di corrente che attraversano le corde B e C. Per ora possiamo calcolare facilmente la corrente di quantità di moto che attraversa A. Nel lampione fluisce quantità di moto a 270° attraverso il campo gravitazionale. Il modulo dell'intensità di corrente è uguale a

$$F = m \cdot g = 3,5 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg} = 35 \text{ N}$$

Questa corrente di quantità di moto fluisce attraverso la corda A verso il *nodo* N. Come prosegue da N in avanti?

Visto che B è una corda, può essere attraversata solo da quantità di moto parallela alla sua direzione. Lo stesso vale per C. Dobbiamo quindi *scomporre* il vettore \vec{F}_A in due vettori: un vettore \vec{F}_B parallelo a

B e un vettore \vec{F}_C parallelo a C. L'intensità totale delle correnti in B e C deve essere uguale a quella in A, deve cioè valere

$$\vec{F}_A = \vec{F}_B + \vec{F}_C$$

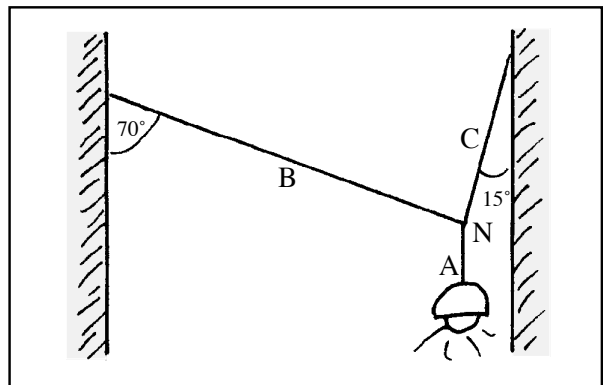


Fig. 6.37. Che carico sopportano i muri a causa del lampione?

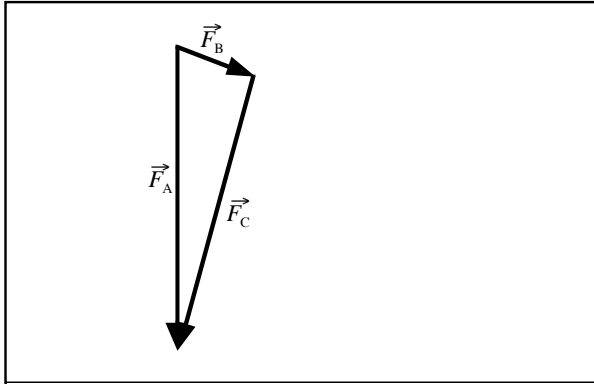


Fig. 6.38. La corrente di quantità di moto che fluisce al nodo N dalla corda A ha la stessa intensità delle due correnti che attraversano le corde B e C messe assieme.

La scomposizione è mostrata in fig. 6.38. \vec{F}_A è parallelo alla corda A, \vec{F}_B è parallelo a B e \vec{F}_C è parallelo a C. Misurando la lunghezza delle frecce vettore \vec{F}_B e \vec{F}_C troviamo

$$F_B = 9 \text{ N}$$

e

$$F_C = 33 \text{ N}.$$

Hai notato che abbiamo avuto a che fare con una vecchia amica? Abbiamo applicato la *regola dei nodi*, la regola dei nodi per correnti di quantità di moto:

Le intensità delle correnti di quantità di moto che fluiscono in un nodo sono complessivamente uguali alle intensità delle correnti che escono dal nodo.

Un nodo è un punto dove confluiscono tre o più correnti di quantità di moto. Con "complessivamente" si intende che le correnti di quantità di moto devono essere sommate vettorialmente.

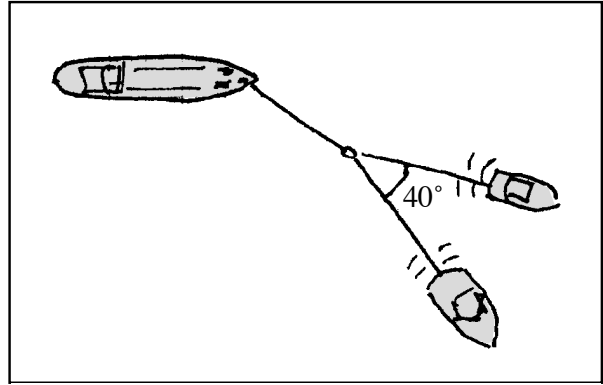


Fig. 6.39. Per l'esercizio 1

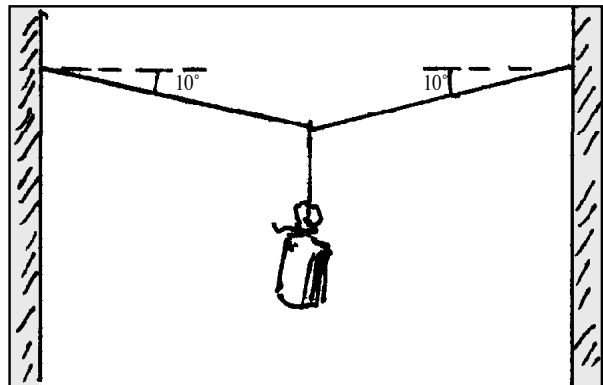


Fig. 6.40. Per l'esercizio 2

Esercizi

1. Due rimorchiatori trainano una nave, fig. 6.39. Ogni rimorchiatore tira con un'intensità di 15 000 N. Quanto intensa è la corrente di quantità di moto nel pezzo di cavo agganciato alla nave?
2. Un oggetto pesante 10 kg deve essere appeso ai ganci in fig. 6.40. La corda resiste a intensità di correnti di 200 N, con correnti più intense si rompe. Cosa succede? Si rompe o no?

7. Momento meccanico e baricentro

7.1 Carrucole e paranchi

Le ruote su cui scorrono corde, catene o cinghie, sono molto importanti per la tecnica. Ruote con corde si usano come carrucole in una gru o in un cosiddetto paranco. Le ruote dentate per le catene ti saranno note da biciclette e motociclette. Ruote sulle quali passa una "cinghia trapezoidale" si trovano, spesso nascoste, in molte macchine, ad esempio nei grossi trapani. Le cinghie di trasmissione piatte erano molto usate nel passato per azionare i macchinari di una fabbrica.

Vogliamo occuparci dei flussi di quantità di moto e di energia attraverso ruote del genere. Cominciamo dalle ruote che possono girare liberamente: le cosiddette *carrucole*. Non sono fissate a un albero con il quale azionano qualcosa, sono montate su dei cuscinetti a sfera che permettono loro di girare molto facilmente.

La fig. 7.1 mostra una carrucola su cui passa una corda. In ognuno dei tre pezzi di corda A, B e C è inserito un dinamometro. Misurano l'intensità della corrente di quantità di moto attraverso la rispettiva corda. L'anello all'estremità destra della corda A viene tirato in modo che il dinamometro corrispondente segni 12 N. Cosa segnano i dinamometri nelle corde B e C?

Possiamo prevedere il risultato. Innanzitutto sappiamo che la corrente di quantità di moto che attraversa A, continua e fluisce nelle corde B e C. Quindi deve valere

$$F_A = F_B + F_C.$$

Visto che tutta la costruzione è simmetrica, deve valere anche:

$$F_B = F_C.$$

Con queste due equazioni si ottiene

$$F_B = F_A/2$$

e

$$F_C = F_A/2.$$

Se $F_A = 12$ N, allora $F_B = 6$ N e $F_C = 6$ N.

Le linee tratteggiate in fig. 7.2 rappresentano il percorso della quantità di moto. Le frecce accanto alle linee indicano la direzione della quantità di moto che fluisce attraverso le corde. Queste frecce sono parallele alle corde.

Possiamo tirare l'anello con più o meno forza. Il valore segnato dal dinamometro nella corda A sarà più o meno grande. Ma cambieranno sempre anche i valori delle correnti di quantità di moto nelle corde B e C e precisamente in modo che

$$F_B = F_C = F_A/2.$$

Ovviamente se tiriamo la corda B o C invece di tirare la corda A, fig. 7.3, non cambia niente.

Passiamo a un caso più complesso, fig. 7.4.

Tiriamo la corda A e constatiamo: non importa quanto forte tiriamo - il dinamometro in A segna sempre lo stesso valore di quello in B. Malgrado ciò le intensità delle correnti di quantità di moto in A e in B non sono uguali. Hanno lo stesso modulo ma si differenziano per la direzione: la quantità di moto che fluisce in una corda ha sempre la stessa direzione della corda. Quindi nella corda A fluisce verso la carrucola quantità di moto a 30° , mentre nella corda B, verso la carrucola fluisce quantità di moto a 0° .

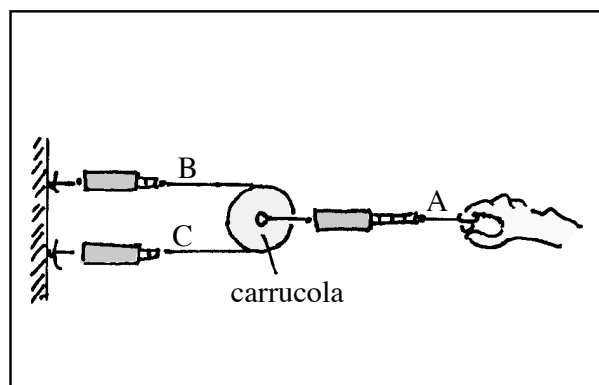


Fig. 7.1. Il dinamometro A segna il doppio di B e di C

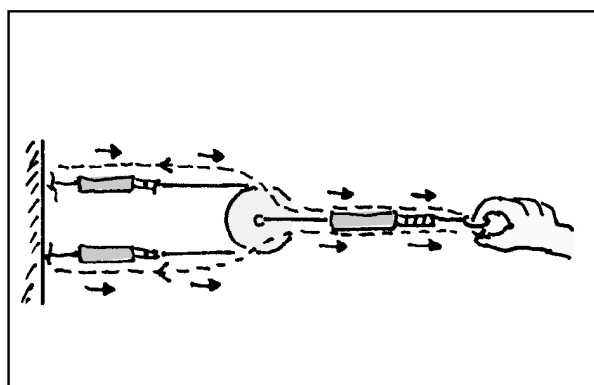


Fig. 7.2. Nella carrucola la corrente di quantità di moto proveniente da destra si suddivide in due parti uguali.

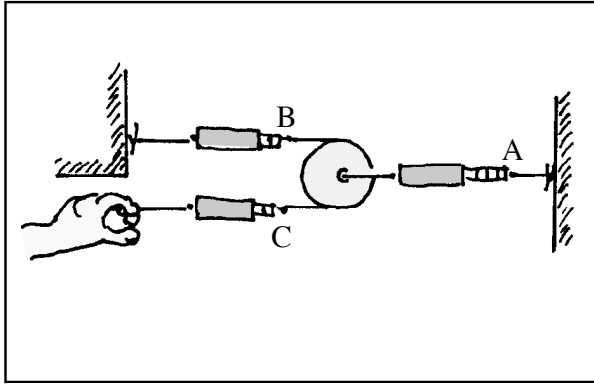


Fig. 7.3. Tirare A, B o C è la stessa cosa.

Attraverso il supporto della carrucola la somma delle due quantità di moto defluisce a terra. Con "somma" si intende naturalmente la somma vettoriale, fig. 7.5.

Visto che \vec{F}_A e \vec{F}_B hanno lo stesso modulo, \vec{F}_C ha la direzione della bisettrice dell'angolo formato dalle due corde.

La fig. 7.6 mostra una variante della situazione in fig. 7.4. Visto che il supporto della carrucola è collegato al muro con una corda (e non con un collegamento rigido) il conduttore C deve avere la stessa direzione della quantità di moto che vi fluisce. Lo si nota tirando A. La corda C si allinea spontaneamente nella direzione della bisettrice tra A e B.

I tre dinamometri a molla mostrano che

$$\vec{F}_C = \vec{F}_A + \vec{F}_B$$

così come

$$F_A = F_B.$$

Riassumiamo:

Se una corda scorre su una ruota che gira liberamente (una carrucola), le correnti di quantità di moto nei due pezzi di corda hanno lo stesso modulo.

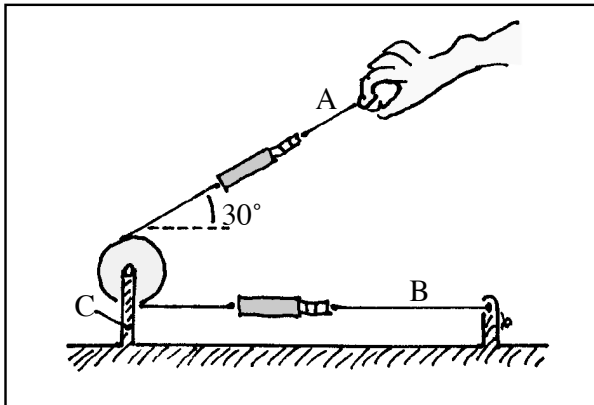


Fig. 7.4. Anche in questo caso i dinamometri A e B segnano lo stesso valore. Malgrado ciò le intensità di corrente sono diverse.

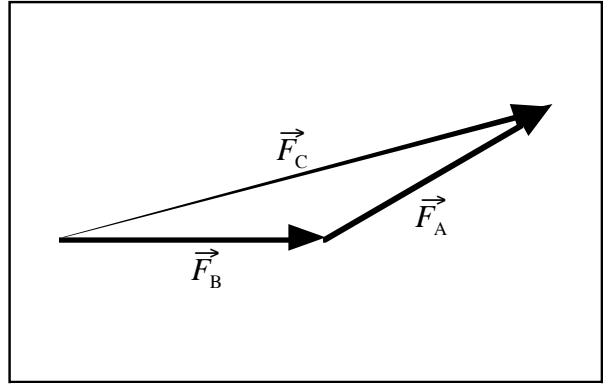


Fig. 7.5. Somma vettoriale delle intensità delle correnti di quantità di moto nelle corde in fig. 7.4.

Si è sottolineato che la ruota deve poter girare liberamente. Ne vedi il motivo? Immaginati che la carrucola in fig. 7.4 sia bloccata e che la corda non possa nemmeno scivolarvi sopra. In quel caso potremmo tirare la corda A senza che la corda B se ne accorga: le intensità di corrente \vec{F}_A e \vec{F}_B non hanno più lo stesso modulo.

Per cosa possiamo usare queste carrucole?

Un carico deve essere sollevato da un motore, fig. 7.7. Il carico è collegato al motore da una corda che passa su due carrucole. Le intensità delle correnti di quantità di moto hanno lo stesso modulo in tutti e tre le parti della corda, ma non la stessa direzione.

Questa applicazione delle carrucole è così semplice che per capirla non c'è bisogno di fare dei ragionamenti fisici complicati. Ci sono però anche delle applicazioni più complesse.

Di nuovo un carico che viene sollevato con un motore, fig. 7.8. La corda è però montata diversamente.

Nella corda C fluisce una corrente di quantità di moto di

$$F_C = m \cdot g = 50 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg} = 500 \text{ N}.$$

Quanto è forte la corrente in A e in B?

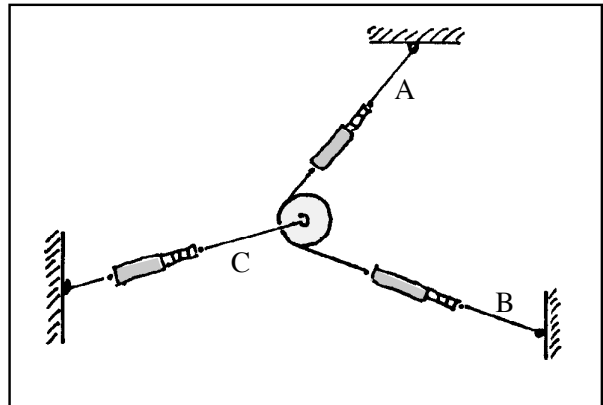


Fig. 7.6. La corda C si allinea spontaneamente nella direzione della bisettrice tra A e B.

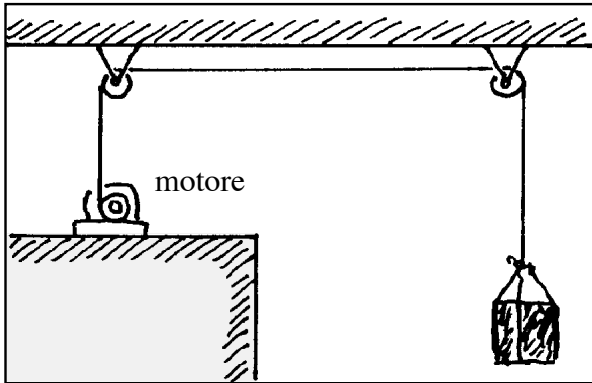


Fig. 7.7. Il motore è sul pavimento. Per sollevare il carico, la corda viene deviata con due paranoie.

Secondo la nostra regola le correnti di quantità di moto in A e B in hanno la stessa intensità. Visto che le corde sono parallele, non solo i moduli, ma anche le direzioni sono uguali, quindi:

$$\vec{F}_B = \vec{F}_B$$

Visto che deve valere

$$\vec{F}_A + \vec{F}_B = \vec{F}_C,$$

ne segue che

$$\vec{F}_A = \vec{F}_B = \vec{F}_C/2.$$

Nella corda A e nella corda B fluiscono quindi solo 250 N per parte - e questo è interessante: per sollevare il carico, il motore deve tirare con solo metà della forza che sarebbe necessaria senza la carrucola.

Questo trucco per la riduzione dell'intensità della corrente di quantità di moto in una corda, è sfruttato ancora più efficacemente dal cosiddetto *paranco*.

La fig. 7.9 mostra una versione di paranco un po' fuori dal comune ma in compenso di facile interpretazione.

I supporti delle quattro carrucole poste in alto sono fissati al soffitto, quelli delle carrucole poste in basso a una sbarra. Il carico da sollevare è appeso a questa sbarra. I primi otto pezzi di corda sono numerati da 1 a 8, la corda di trazione è contrassegnata da una

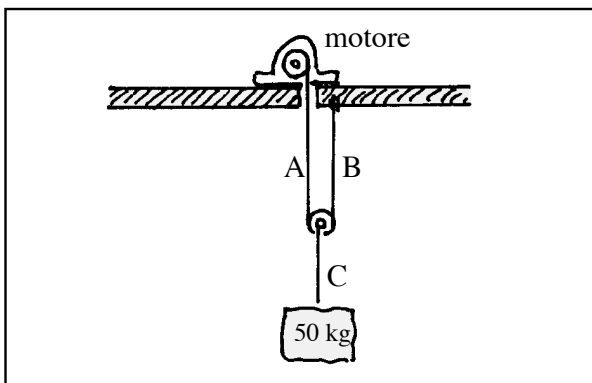


Fig. 7.8. La corrente di quantità di moto nella corda di trazione è intensa la metà di quella nella corda di carico.

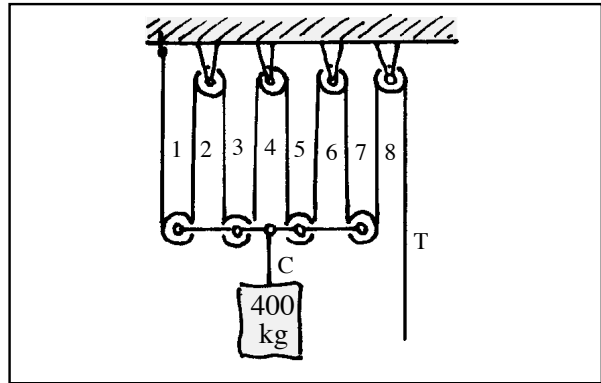


Fig. 7.9. Paranco scomodo ma comprensibile

T e il carico è appeso a C.

Per sollevare il carico tiriamo la corda T. Che intensità ha la corrente di quantità di moto in T?

Procediamo verso la soluzione passo dopo passo. Visto che i due pezzi di corda 1 e 2 appartengono a una stessa corda che scorre su una carrucola (la carrucola in basso a sinistra), le intensità delle correnti in questi pezzi di corda devono essere uguali:

$$F_1 = F_2.$$

Puoi immaginare come andare avanti. In conclusione deve valere:

$$F_1 = F_2 = F_3 = F_4 = F_5 = F_6 = F_7 = F_8 = F_T.$$

Il prossimo passo: possiamo interpretare come un nodo, tutta la sbarra su cui si trovano le carrucole poste in basso. La corrente di quantità di moto F_C , proveniente dal carico, fluisce nella sbarra, le correnti da F_1 a F_8 defluiscono dalla sbarra. Con la regola dei nodi possiamo concludere:

$$F_C = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6 + F_7 + F_8$$

Visto che le intensità di corrente F_1 fino a F_8 sono uguali tra loro, vale

$$F_1 = F_2 = F_3 = F_4 = F_5 = F_6 = F_7 = F_8 = F_C/8.$$

Ma anche F_T ha lo stesso valore di F_1 fino a F_8 e quindi:

$$F_T = F_C/8.$$

Per sollevare il carico è quindi sufficiente 1/8 della corrente di quantità di moto che fluisce attraverso il carico. Di conseguenza è molto più facile sollevarlo con il paranco che senza.

Un vero paranco si differenzia poco da quello che abbiamo appena esaminato, fig. 7.10. Tutte le carrucole poste in alto sono montate sullo stesso perno, ognuna può girare liberamente. Lo stesso vale per le altre carrucole.

Questi paranchi si possono trovare nelle gru in grado di sollevare pesanti carichi, ad esempio nei porti.

Un paranco è un oggetto molto utile. Ci fa guadagnare qualcosa: con una piccola corrente di quantità di moto si riesce a produrne una grande.

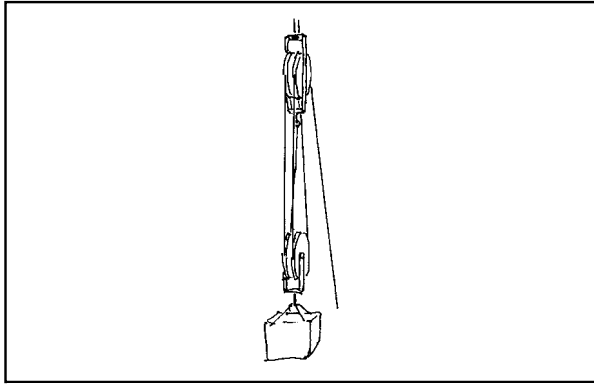


Fig. 7.10. Paranco

Per quanto riguarda l'energia per contro non abbiamo guadagnato niente.

Nel prossimo paragrafo faremo il bilancio energetico per il paranco.

Esercizi

1. Disegna un paranco dove la corrente di quantità di moto che fluisce attraverso il gancio a cui è appeso il carico sia quattro volte più forte che nella corda di trazione.
2. Qual è l'intensità della corrente di quantità di moto nella corda di trazione del paranco in fig. 7.11?
3. Qual è lo svantaggio del paranco in fig. 7.12?

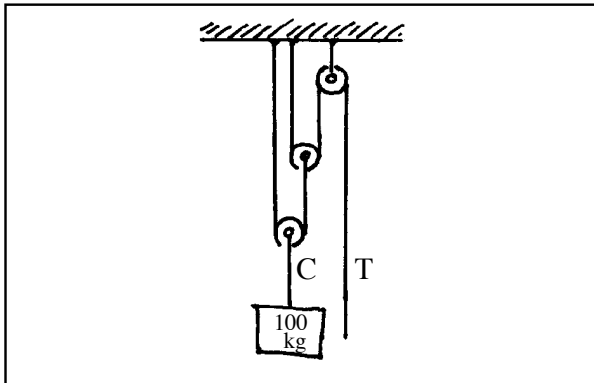


Fig. 7.11. Per l'esercizio 2

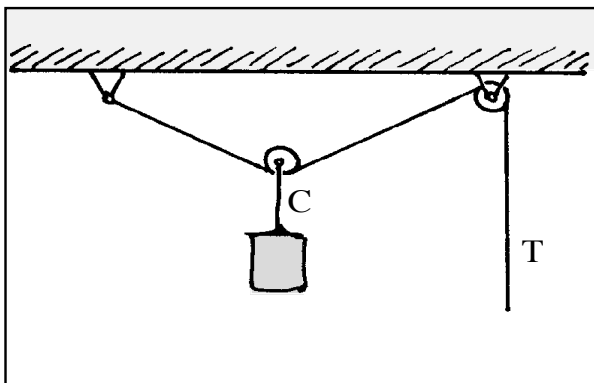


Fig. 7.12. Per l'esercizio 3

7.2 Il bilancio energetico per il paranco

Tiriamo la corda di trazione T (fig. 7.9) in modo che la sua estremità si sposti di un tratto s_T . Secondo la nostra vecchia formula, la quantità di energia che così facendo spendiamo attraverso la corda è:

$$E_T = s_T \cdot F_T \quad (1)$$

Alla corda che sostiene il carico giunge energia dal paranco. Ne arriva

$$E_C = s_C \cdot F_C \quad (2)$$

Vogliamo confrontare E_T e E_C . Per farlo sfruttiamo la relazione

$$F_T = F_C / 8 \quad (3)$$

Inoltre dobbiamo prima procurarci la relazione tra s_C e s_T . Ci chiediamo quindi: di che tratto s_C sale il carico quando tiriamo la corda di trazione in modo che la sua estremità scenda di un tratto s_T ?

Quando tiriamo T , i pezzi di corda da 1 a 8 si accorciano complessivamente dello stesso tratto. Quindi ogni singolo pezzo di corda si accorcia di $s_T / 8$. Ma l'accorciamento delle corde da 1 a 8 coincide con il tratto s_C di cui viene sollevato il carico. Quindi

$$s_T = 8s_C \quad (4)$$

Sostituiamo (3) e (4) in (1) e otteniamo:

$$E_T = 8s_C \cdot F_C / 8 = s_C \cdot F_C$$

La quantità di energia E_T che forniamo al paranco tirando la corda T è uguale a $s_C \cdot F_C$, cioè uguale a E_C , stando all'equazione (2).

Quindi l'energia che forniamo a T riappare in C - un risultato che spero non troverai sorprendente.

Espresso diversamente: paghiamo la minore intensità della corrente di quantità di moto con un percorso più lungo da percorrere. Se vogliamo sollevare il carico di 1 m, dobbiamo far passare 8 m di corda sul paranco.

Esercizi

1. Con il paranco in fig. 7.11 si solleva di 1 m un carico di 100 kg. Quanti metri della corda di trazione si devono tirare? Quanta energia ci vuole?
2. La corda di trazione T in fig. 7.13 viene tirata verso l'alto di 1 m. Quanta energia fluisce nel paranco?
3. La fig. 7.14 mostra come sollevare un carico con l'aiuto di due motori. Il carico ha una massa di 200 kg. Il motore a sinistra avvolge la corda T_{sin} in modo che abbia una velocità di 0,2 m/s. Il motore a destra avvolge la corda T_{des} in modo che abbia una velocità di 0,4 m/s. Che intensità hanno le correnti di quantità di moto in T_{sin} e T_{des} ? Qual è l'intensità della corrente di energia nelle due corde?

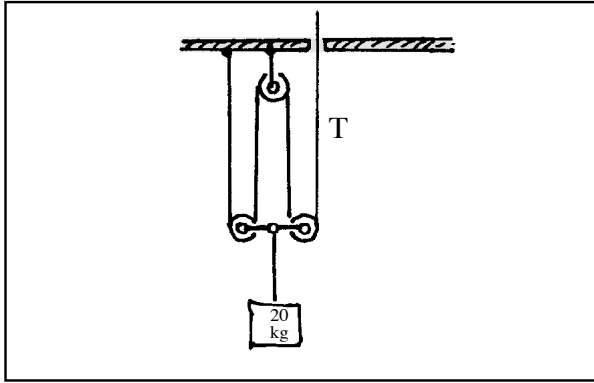


Fig. 7.13. Per l'esercizio 2

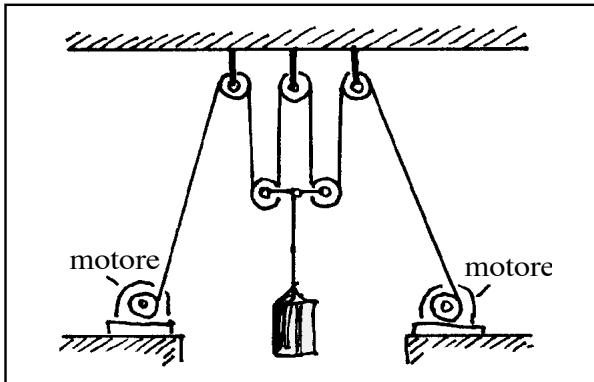


Fig. 7.14. Per l'esercizio 3

7.3 La legge della leva

Le carrucole le conosciamo bene. Sappiamo che la corrente di quantità di moto che in fig. 7.15 arriva da A, si ramifica in due parti uguali. Visto che tutto quanto è fermo, possiamo anche sostituire la carrucola con una sbarra senza che per le correnti di quantità di moto cambi qualcosa, fig. 7.16.

Anche in questo caso valgono:

$$F_B = F_A/2$$

e

$$F_C = F_A/2.$$

Se non ne sei convinto verificalo sperimentalmente.

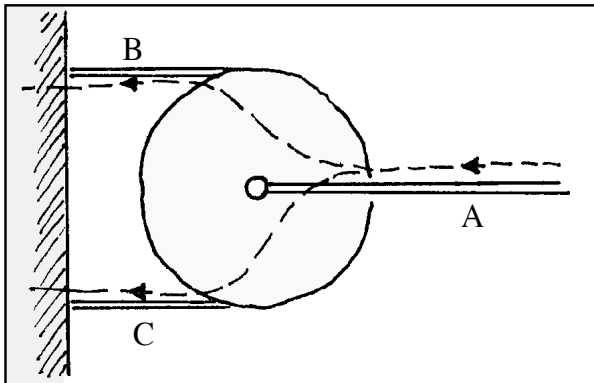


Fig. 7.15. Nella carrucola la corrente di quantità di moto che arriva da A si suddivide in due parti uguali.

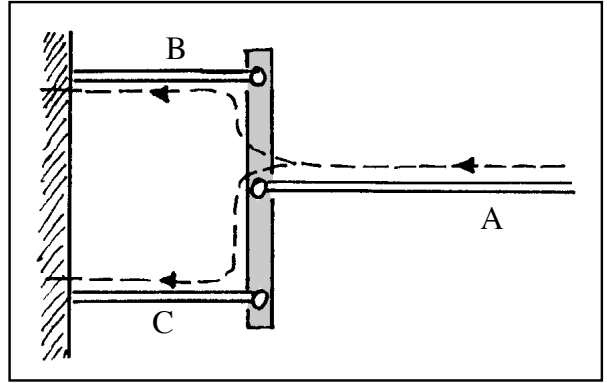


Fig. 7.16. La carrucola può essere sostituita con una sbarra senza che le correnti di quantità di moto cambino.

Modifichiamo ulteriormente la costruzione: fissiamo la corda A non più al centro della sbarra, ma asimmetricamente - come mostra la fig. 7.17. Chiamiamo r_B e r_C le lunghezze dei bracci della leva.

Misurando troviamo

$$r_B \cdot F_B = r_C \cdot F_C$$

che può anche essere espresso nella forma

$$\frac{F_B}{F_C} = \frac{r_C}{r_B}$$

A parole:

Le intensità delle correnti di quantità di moto sono inversamente proporzionali ai bracci della leva.

Questa è la *legge della leva*.

Nel caso in fig. 7.17

$$r_B = 0,3 \text{ m}$$

$$r_C = 0,6 \text{ m}.$$

Di conseguenza

$$\frac{F_B}{F_C} = \frac{0,6 \text{ m}}{0,3 \text{ m}} = 2$$

e cioè $F_B = 2 \cdot F_C$.

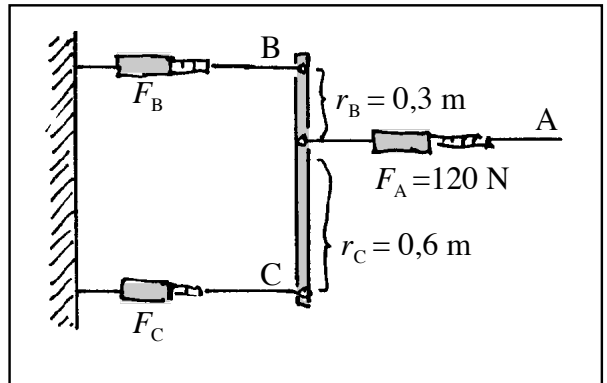


Fig. 7.17. La corrente di quantità di moto che arriva dalla corda A, si suddivide in due parti di intensità diversa.

Inoltre, considerando che

$$F_B + F_C = 120 \text{ N}$$

si ottiene

$$F_B = 80 \text{ N}$$

e

$$F_C = 40 \text{ N}.$$

La legge della leva può essere espressa in una forma più comoda. Per farlo descriviamo nuovamente la costruzione di fig. 7.17 ma con parole un po' diverse e usando altri simboli, fig. 7.18.

Abbiamo una sbarra rigida e ferma. In tre punti della sbarra sfociano delle correnti di quantità di moto. Chiamiamo *fulcro* uno dei tre punti e lo contrassegniamo con una P. Le distanze da P degli altri due punti sono i bracci della leva. Le chiamiamo r_D e r_S . Con F_D e F_S indichiamo le intensità delle correnti di quantità di moto che sfociano nei punti esterni. Fin qui niente di nuovo.

A questo punto introduciamo un nuovo termine importante: chiamiamo *momenti meccanici* i due prodotti $r_D \cdot F_D$ e $r_S \cdot F_S$. In particolare $r_D \cdot F_D$ è il *momento meccanico destrorso* (ossia in senso orario) e $r_S \cdot F_S$ il *momento meccanico sinistrorso* (ossia in senso antiorario).

Ma cosa c'entra il nostro problema con le rotazioni? La sbarra può ruotare attorno al punto P. Immaginiamo che non ci sia la corda in basso. In quel caso la corda in alto farebbe ruotare la sbarra, una rotazione in senso antiorario. Da cui il nome momento meccanico sinistrorso. Immaginiamo che sia invece la corda in alto a mancare. Allora la sbarra ruoterebbe in senso orario attorno al punto P.

Con i nuovi simboli, la legge della leva ha la forma:

$$r_D \cdot F_D = r_S \cdot F_S$$

e a parole

Il momento meccanico destrorso è uguale al momento meccanico sinistrorso.

Se formuliamo in questo modo la legge della leva, ci accorgiamo di poterla applicare alla sbarra in fig.

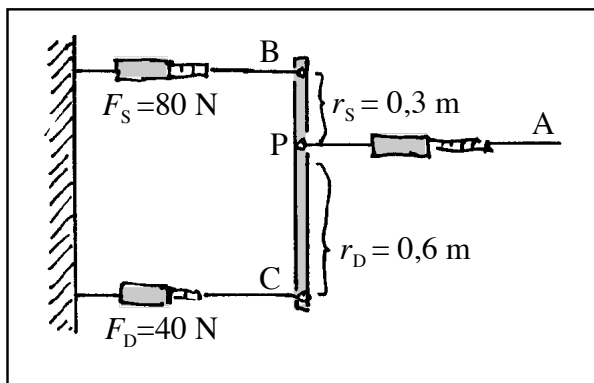


Fig. 7.18. Come la fig. 7.17; solo i nomi sono cambiati.

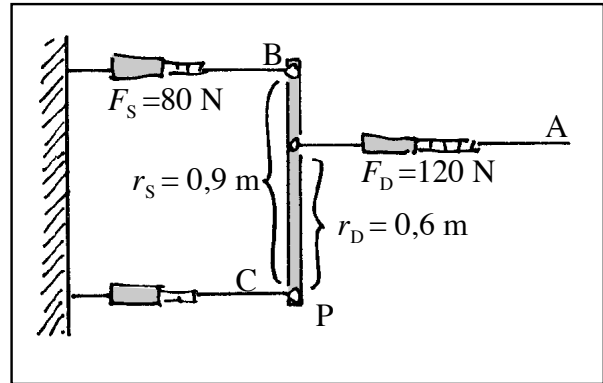


Fig. 7.19. La corda A vorrebbe ruotare la sbarra in senso orario attorno al fulcro P, la corda B in senso antiorario.

7.17 in modi diversi da quelli usati finora. Dobbiamo però ancora aggiungere che sei libero di scegliere la posizione del fulcro P.

La fig. 7.19 mostra la stessa sbarra di fig. 7.17. Questa volta il fulcro è stato posto all'estremità inferiore della sbarra. La corda A tende a ruotare la sbarra in senso orario attorno al nuovo fulcro, la corda B tende a ruotarla in senso antiorario. I bracci della leva misurano

$$r_D = 0,6 \text{ m} \quad \text{e} \quad r_S = 0,9 \text{ m}.$$

Le intensità delle correnti di quantità di moto sono già note:

$$F_D = 120 \text{ N} \quad \text{e} \quad F_S = 80 \text{ N}.$$

Il momento meccanico destrorso

$$r_D \cdot F_D = 0,6 \text{ m} \cdot 120 \text{ N} = 72 \text{ Nm}$$

è effettivamente uguale al momento meccanico sinistrorso:

$$r_S \cdot F_S = 0,9 \text{ m} \cdot 80 \text{ N} = 72 \text{ Nm}.$$

Nota che l'unità di misura del momento meccanico è il Nm (letto "Newton-metro").

Infine poniamo il fulcro all'estremità superiore della sbarra, fig. 7.20. Ora la corda A tira in senso antiorario e la corda C in senso orario. I bracci della leva misurano

$$r_D = 0,9 \text{ m} \quad \text{e} \quad r_S = 0,3 \text{ m}.$$

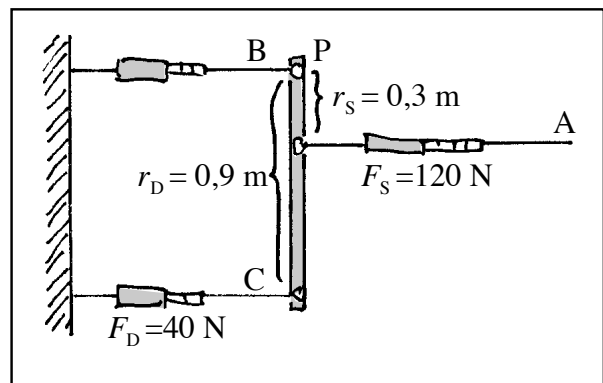


Fig. 7.20. La corda C vorrebbe ruotare la sbarra in senso orario attorno al fulcro P, la corda A in senso antiorario.

Le rispettive intensità delle correnti di quantità di moto sono

$$F_D = 40 \text{ N} \quad \text{e} \quad F_S = 120 \text{ N}.$$

Per il momento meccanico destrorso si ottiene

$$r_D \cdot F_D = 0,9 \text{ m} \cdot 40 \text{ N} = 36 \text{ Nm}$$

e per il momento meccanico sinistrorso

$$r_S \cdot F_S = 0,3 \text{ m} \cdot 120 \text{ N} = 36 \text{ Nm}.$$

Ancora una volta i due momenti meccanici sono uguali, la legge della leva è rispettata.

Esempio: sbarra caricata

Un corpo pesante ($m = 80 \text{ kg}$) è appeso a una sbarra orizzontale, fig. 7.21. Il peso della sbarra sia così piccolo rispetto a quello del corpo da permetterci di trascurarlo. Che carico devono sopportare i supporti della sbarra?

Scegliamo come fulcro il punto della sbarra dove è appeso il carico.

La corrente di quantità di moto che fluisce dal corpo al punto P ha l'intensità

$$F_P = m \cdot g = 80 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg} = 800 \text{ N}.$$

Il supporto C tende a ruotare la sbarra in senso antiorario, il supporto B tende a ruotarla in senso orario. I bracci della leva sono:

$$r_D = 4,5 \text{ m} \quad \text{e} \quad r_S = 1,5 \text{ m}.$$

La legge della leva afferma

$$\frac{F_S}{F_D} = \frac{r_D}{r_S} = \frac{4,5 \text{ m}}{1,5 \text{ m}} = 3$$

quindi: $F_S = 3F_D$.

La corrente di quantità di moto di 800 N che affluisce alla sbarra nel punto P, si suddivide nel seguente modo: verso il supporto C fluisce il triplo di quantità di moto che in direzione di B.

Sapendo che $F_P = F_D + F_S$, otteniamo

$$F_D = 200 \text{ N}$$

$$F_S = 600 \text{ N}.$$

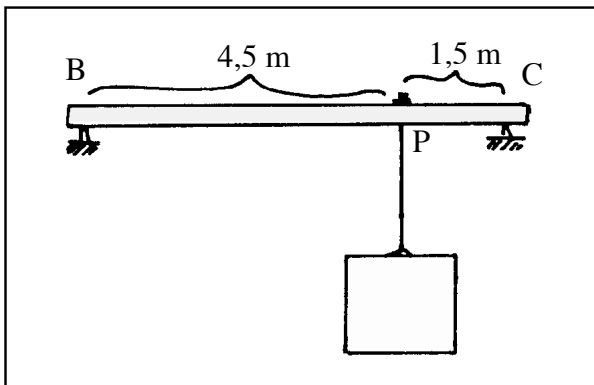


Fig. 7.21. La corrente di quantità di moto che fluisce da P verso C è tre volte più intensa di quella che fluisce verso B.

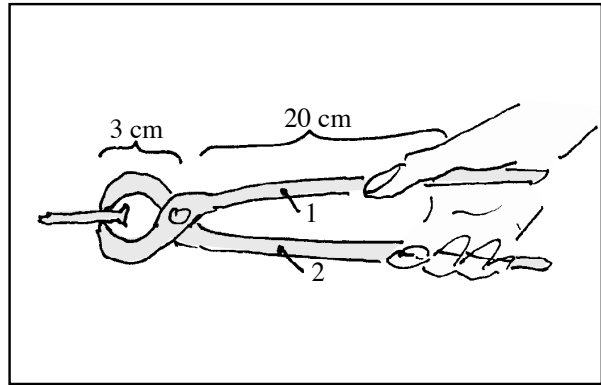


Fig. 7.22. Una tenaglia è composta da due leve. Ognuna delle leve ha un braccio corto e uno lungo.

Esempio: la tenaglia

Una tenaglia è fatta da due leve collegate da uno snodo, fig. 7.22. Esaminiamone una, la leva 1. Per tranciare un chiodo la stringiamo a una distanza di 20 cm dallo snodo. La corrente di quantità di moto che fluisce nell'impugnatura ha un'intensità di 30 N. Le lame della tenaglia sono a 3 cm dallo snodo. Scegliamo lo snodo come fulcro e così

$$r_D = 0,2 \text{ m}, \quad r_S = 0,03 \text{ m} \quad \text{e} \quad F_D = 30 \text{ N}.$$

Calcolando l'intensità della corrente di quantità di moto nel chiodo si ottiene:

$$F_S = \frac{r_D}{r_S} F_D = \frac{0,2 \text{ m}}{0,03 \text{ m}} \cdot 30 \text{ N} = 200 \text{ N}$$

Con una leva, una piccola corrente di quantità di moto può produrne una grande.

La legge della leva è applicabile anche in situazioni completamente diverse. Primo, non è indispensabile che i tre punti considerati siano allineati e secondo, non è necessario che i tre vettori intensità delle correnti di quantità di moto siano paralleli.

La fig. 7.23 mostra un corpo in cui sfociano tre correnti di quantità di moto. Scegliamo come fulcro il supporto fissato alla parete. La corda in alto tende a generare una rotazione in senso antiorario, la corda in basso in senso orario.

Quali sono i bracci della leva? Tracciamo due rette che passano dai punti dove le corde sono fissate al

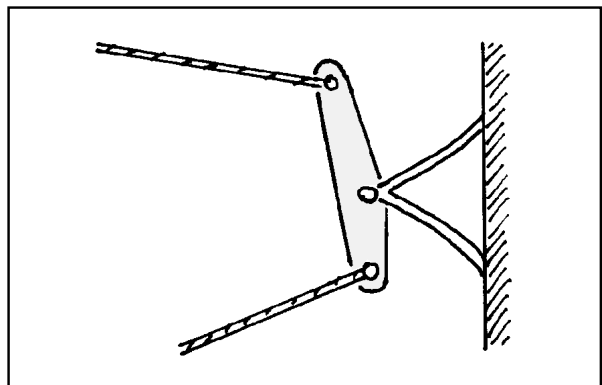


Fig. 7.23. Non è indispensabile che i tre punti dove sfociano le correnti di quantità di moto siano allineati e i tre vettori intensità delle correnti di quantità di moto non devono necessariamente essere paralleli.

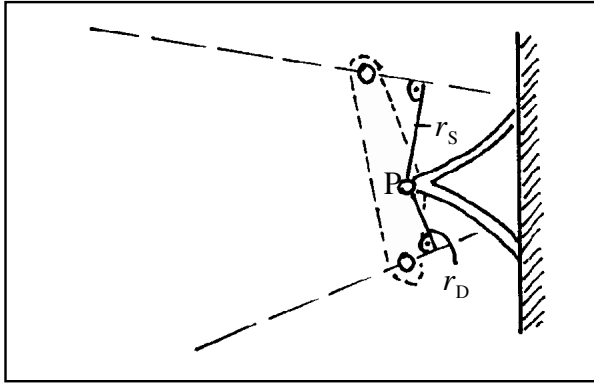


Fig. 7.24. Come in fig. 7.23, ma con i bracci della leva e le linee di costruzione.

corpo e le cui direzioni siano parallele a quelle delle rispettive corde, fig. 7.24.

I bracci della leva non sono altro che le distanze di queste rette dal fulcro P.

Esempio: la leva di inversione

Qual è l'intensità della corrente di quantità di moto che attraversa la corda orizzontale in fig. 7.25?

Scegliamo arbitrariamente come fulcro il punto dove la leva è fissata al muro, fig. 7.26. La corda orizzontale tende a generare una rotazione in senso orario attorno a P, quella verticale in senso antiorario. In fig. 7.26 sono disegnati i bracci della leva e le linee usate per trovarli. Dal disegno otteniamo:

$$r_D = 0,2 \text{ m} \quad \text{e} \quad r_S = 0,4 \text{ m}.$$

L'intensità della corrente di quantità di moto nella corda verticale è:

$$F_S = m \cdot g = 24 \text{ kg} \cdot 10 \text{ N/kg} = 240 \text{ N}.$$

La legge della leva ci dà:

$$F_D = \frac{r_S}{r_D} F_S = \frac{0,4 \text{ m}}{0,2 \text{ m}} \cdot 240 \text{ N} = 480 \text{ N}$$

Possiamo anche chiederci che carico deve sostenere il supporto, cioè l'intensità della corrente di quantità di moto nel punto P. Visto che i vettori intensità di corrente nelle due corde non sono paralleli, non possiamo semplicemente sommare i moduli di F_D e F_S . Dobbiamo sommare vettorialmente:

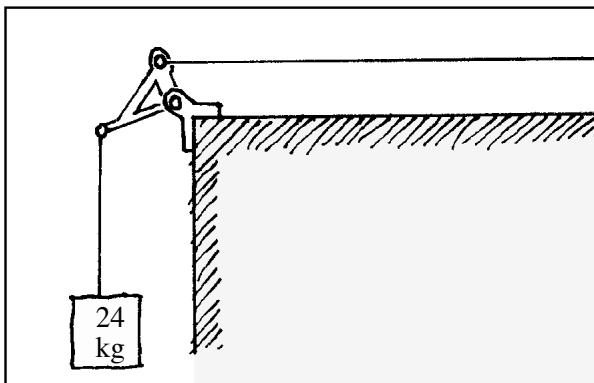


Fig. 7.25. Leva di inversione

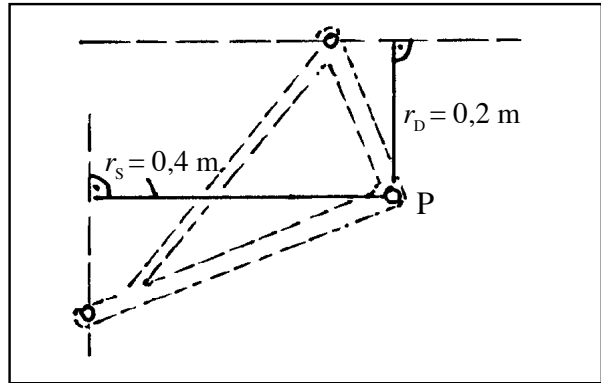


Fig. 7.26. Ingrandimento di una parte della fig. 7.25 con i bracci della leva e le linee di costruzione.

$$\vec{F}_P = \vec{F}_D + \vec{F}_S$$

Esercizi

1. La fig. 7.27 mostra una parte dei freni di un veicolo. Si tira una leva con una sbarra. La leva tende un cavo collegato ai freni che si trovano sulle ruote. Che intensità deve avere la corrente di quantità di moto nella sbarra di trazione affinché nel cavo del freno fluisca una corrente di 50 N?

2. La gru a ponte in fig. 7.28 è larga 12 m, come il magazzino. La gru sta sostenendo un carico di 9 tonnellate (1 tonnellata = 1000 kg). Quanto vengono caricati i binari alle estremità (oltre al peso della gru) quando il carico è appeso al centro? Quanto vengono caricati se invece il carico è appeso a una distanza di 4 m dal binario a sinistra?

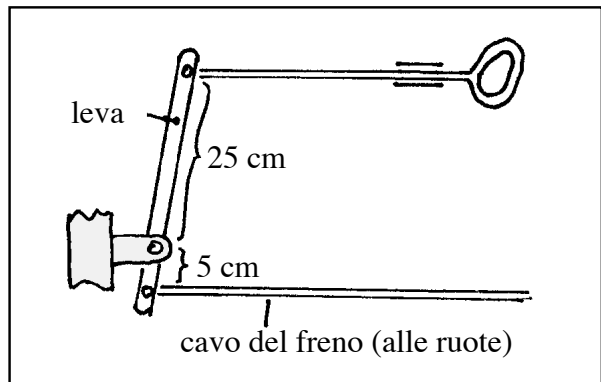


Fig. 7.27. Per l'esercizio 1

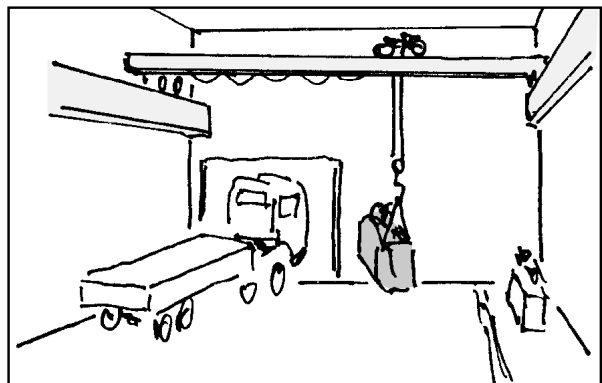


Fig. 7.28. Per l'esercizio 2

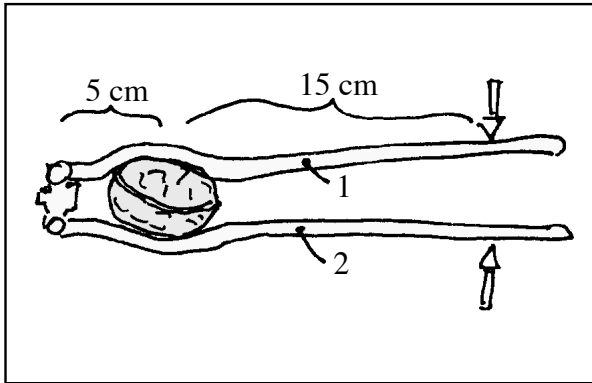


Fig. 7.29. Per l'esercizio 3

3. L'impugnatura dello schiaccianoci in fig. 7.29 viene stretta a una distanza di 15 cm dalla noce. Per rompersi, la noce deve essere attraversata da una corrente di quantità di moto di 80 N. Con che forza dobbiamo stringere?

4. Un peso è appeso a una sbarra orizzontale. La sbarra è fissata in due punti, fig. 7.30. In A preme verso il basso, in B verso l'alto. Questo significa che i vettori intensità delle correnti di quantità di moto in A e in B sono verticali - esattamente come quello della corda che sostiene il peso. Quanto sono caricati i punti A e B? (Che intensità hanno le correnti di quantità di moto che defluiscono dalla sbarra in A e in B?)

Per calcolare l'intensità della corrente in B, scegli A come fulcro; per calcolare l'intensità della corrente in A, scegli B come fulcro.

5. Un lampione pesante 8 kg è appeso a una sbarra trattenuta da una corda, fig. 7.31. Qual è l'intensità della corrente di quantità di moto che fluisce attraverso la corda?

Scegli come fulcro il punto dove la sbarra è fissata al muro.

6. A cosa serve una chiave inglese? Perché non fissiamo il dado con le mani?

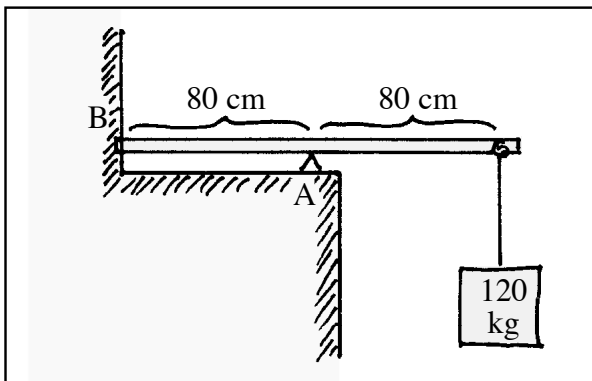


Fig. 7.30. Per l'esercizio 4

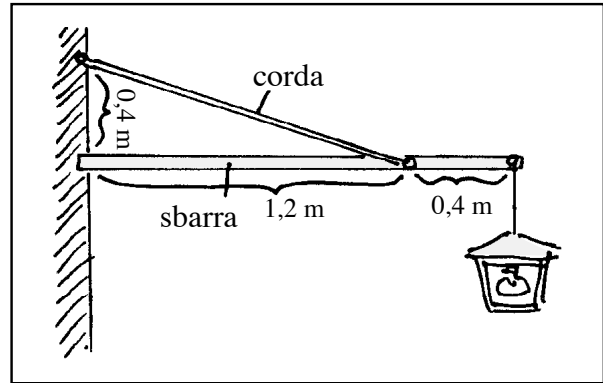


Fig. 7.31. Per l'esercizio 5

7.4 Equilibrio

In fig. 7.32 tutto è a posto. Da destra e da sinistra entrano nella sbarra due correnti di quantità di moto di 50 N, da P defluiscono 100 N. La legge della leva

$$r_D \cdot F_D = r_S \cdot F_S$$

è rispettata.

Cerchiamo ora di violare la legge della leva: nessuno ci può impedire di appendere alla sbarra due pesi di massa diversa, fig. 7.33a. La natura però si ribella a questa violazione della legge della leva. Come sicuramente avrai previsto, succede quanto mostrato in fig. 7.33b: i corpi si mettono in moto assieme alla sbarra. In altre parole non c'è più *equilibrio*, a differenza della fig. 7.32.

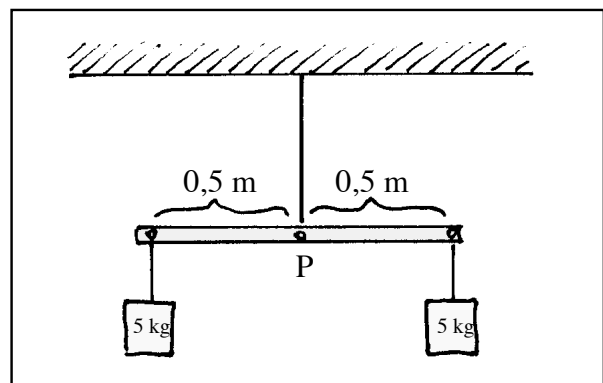


Fig. 7.32. La legge della leva è rispettata, la sbarra è in equilibrio.

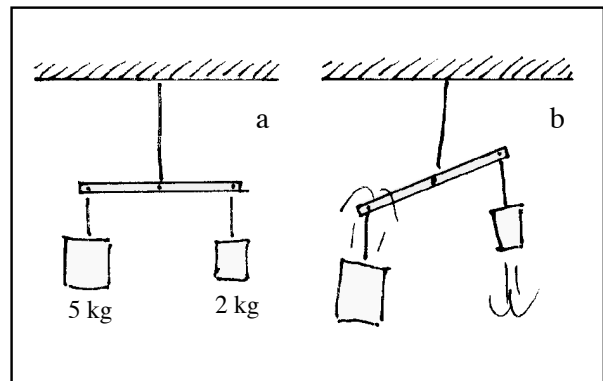


Fig. 7.33. (a) Un tentativo di violare la legge della leva. (b) Corpo e sbarra si muovono.

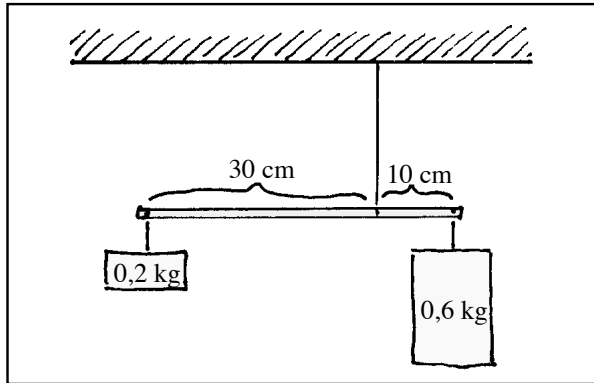


Fig. 7.34. Situazione di equilibrio con bracci della leva di diversa lunghezza.

La legge della leva è rispettata anche nella situazione in fig. 7.34, la costruzione resta in equilibrio - questa volta con bracci della leva diversi tra loro.

Siamo ora in grado di precisare la formulazione della legge della leva:

Un corpo sospeso e libero di ruotare, è in equilibrio se il momento meccanico destrorso è uguale al momento meccanico sinistrorso.

Esercizi

1. Calcola i momenti meccanici destrorso e sinistrorso per la sbarra in fig. 7.35. Si trova in equilibrio?
2. Un sasso pesante 500 kg deve essere sollevato con l'aiuto della leva in fig. 7.36. Supponi che metà della massa del sasso gravi sulla leva. Ce la farà la ragazza? (Pesa 50 kg)

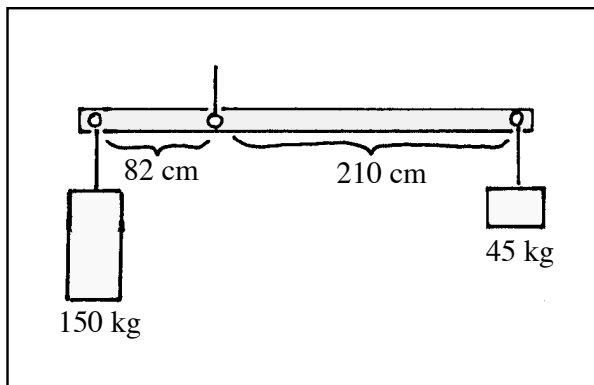


Fig. 7.35. Per l'esercizio 1

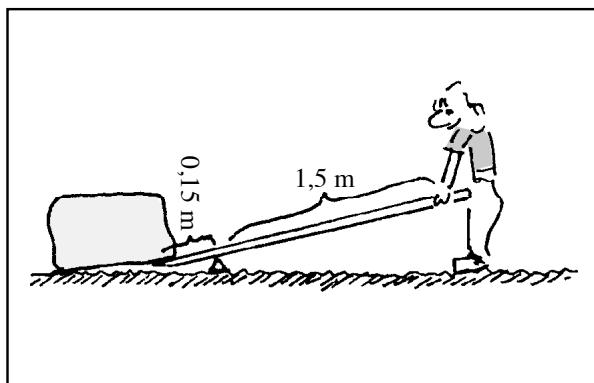


Fig. 7.36. Per l'esercizio 2

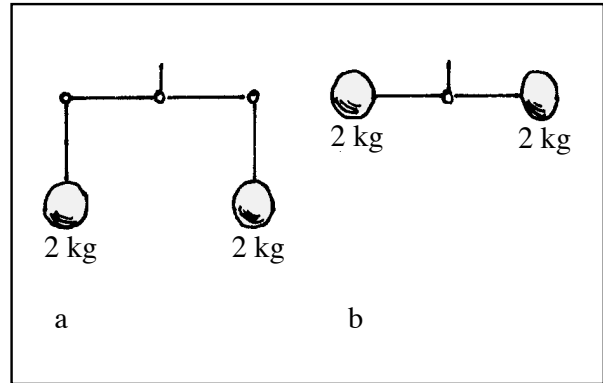


Fig. 7.37. (a) La sbarra è in equilibrio. (b) Il corpo a forma di bilanciere è in equilibrio.

7.5 Il baricentro

La sbarra in fig. 7.37a è in equilibrio. Confronta la situazione con quella in fig. 7.37b. L'unica differenza: le sfere non sono più appese a delle corde ma sono fissate alla sbarra; con la sbarra costituiscono un solo corpo, una specie di bilanciere per il sollevamento pesi.

Ovviamente anche il bilanciere è in equilibrio. Due correnti di quantità di moto affluiscono alle estremità dal bilanciere. (Provengono dalla Terra attraverso il campo gravitazionale.) Le correnti di quantità di moto si incontrano nel fulcro e da lì lasciano il bilanciere.

La stessa cosa con altre parole: abbiamo appeso un unico corpo in un punto attorno al quale può ruotare liberamente e quel corpo è in equilibrio: non si muove spontaneamente.

Ora ruotiamo leggermente il bilanciere, fig. 7.38a. Cosa succede se lo lasciamo andare? Assolutamente nulla. Resta nella nuova posizione, è ancora in equilibrio.

Capiamo il perché grazie alla fig. 7.38b. I punti in cui sfociano le correnti di quantità di moto provenienti dalla Terra sono là dove ci sono le sfere. I vettori intensità di corrente sono verticali. Da cui le linee tratteggiate verticali. Entrambi i bracci della leva r_D e r_S sono più corti che nella fig. 7.38a. Però si sono accorciati allo stesso modo: con la rotazione r_D si è ridotto della metà e anche r_S si è ridotto della metà.

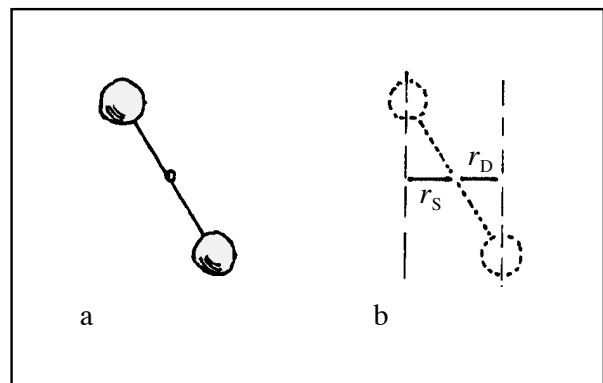


Fig. 7.38. Con la rotazione i bracci della leva si sono ridotti della metà.

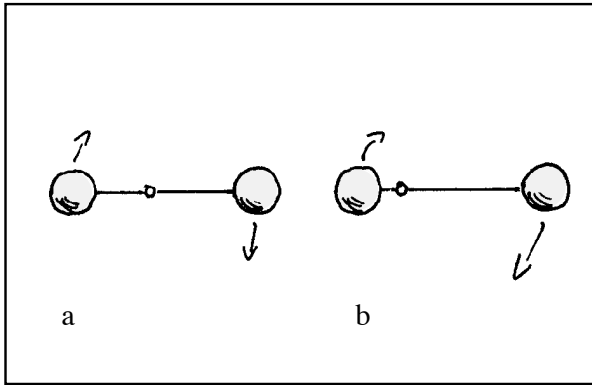


Fig. 7.39. Ancora il corpo di fig. 7.37b. Solo il fulcro è stato scelto diversamente.

Naturalmente F_D e F_S sono rimaste invariate. Anche i momenti meccanici $r_D \cdot F_D$ e $r_S \cdot F_S$ si sono ridotti della metà e questo significa che come prima

$$r_D \cdot F_D = r_S \cdot F_S.$$

Il bilanciante è quindi rimasto in equilibrio. Possiamo ruotarlo come vogliamo - resta sempre in equilibrio.

Se la costruzione del fulcro lo permette, possiamo ruotarlo anche nella terza dimensione, perpendicolare al piano del disegno in fig. 7.38. Nemmeno questo cambia il fatto che il bilanciante resta in equilibrio.

Ancora lo stesso bilanciante, fig. 7.39a, ma con un altro fulcro. Ovviamente non è più in equilibrio e non lo è nemmeno in fig. 7.39b. Esiste un solo fulcro che lo mantiene in equilibrio indipendentemente dal suo orientamento. Questo punto viene chiamato *baricentro*.

Non solo i corpi a forma di bilanciante hanno un baricentro. Ogni oggetto ha un baricentro e ne ha solo uno. Se appendiamo un oggetto in questo punto, è in equilibrio e resta in equilibrio anche se lo ruotiamo.

Spesso il baricentro di un corpo si trova nel suo interno. Come facciamo allora ad appenderlo per questo punto lasciando che possa ruotare liberamente?

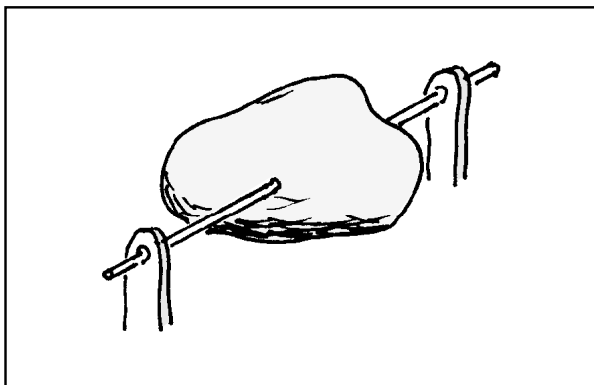


Fig. 7.40. L'asse passa per il baricentro. Il corpo è in equilibrio in ogni posizione.

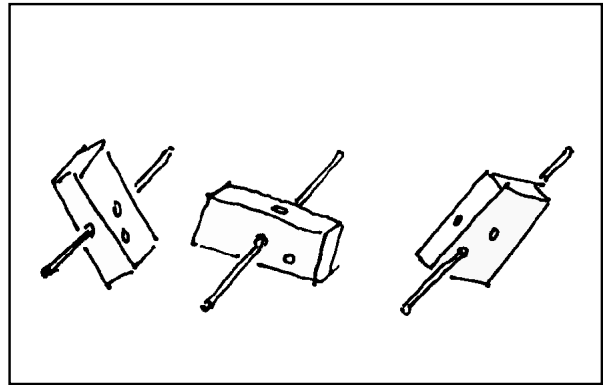


Fig. 7.41. Assi diversi che passano per il baricentro: il corpo è sempre in equilibrio.

Perforiamo il corpo passando per il baricentro e infiliamo un asse nel foro ottenuto. L'asse viene appoggiato su dei supporti che lo lasciano libero di ruotare. Il corpo è ancora in equilibrio indipendentemente da come lo giriamo, fig. 7.40.

Ci sono molti modi per fare un buco di questo tipo. Il metodo è irrilevante. L'importante è che il buco passi per il baricentro, fig. 7.41.

Riassumiamo:

Ogni corpo ha esattamente un baricentro. Se lo appendiamo in modo che possa ruotare liberamente attorno al baricentro, il corpo resta in equilibrio indipendentemente dalla direzione in cui lo orientiamo.

Se un oggetto è sufficientemente simmetrico, è facile prevedere la posizione del baricentro.

In una sfera, un cubo, un cilindro o un parallelepipedo è semplicemente il centro geometrico, fig. 7.42.

Ma solo a condizione che la massa sia distribuita uniformemente. Se un cubo è fatto per metà di piombo e per metà di alluminio, fig. 7.43, il suo baricentro non è più al centro, ma spostato dalla parte del piombo.

In molti corpi il baricentro si trova al di fuori del materiale di cui è fatto il corpo, per esempio in un anello o in un oggetto a forma di U, fig. 7.44.

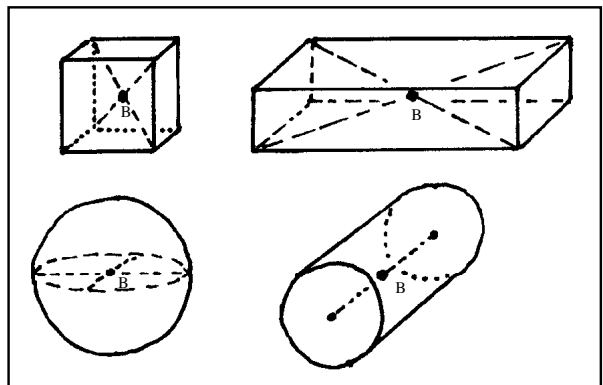


Fig. 7.42. In questi corpi il baricentro coincide con il centro geometrico.

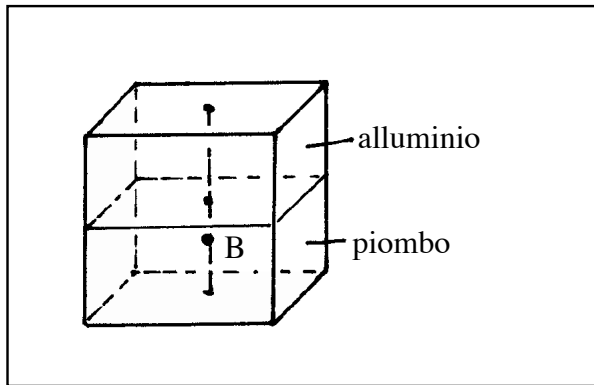


Fig. 7.43. Il baricentro non è nel centro del cubo.

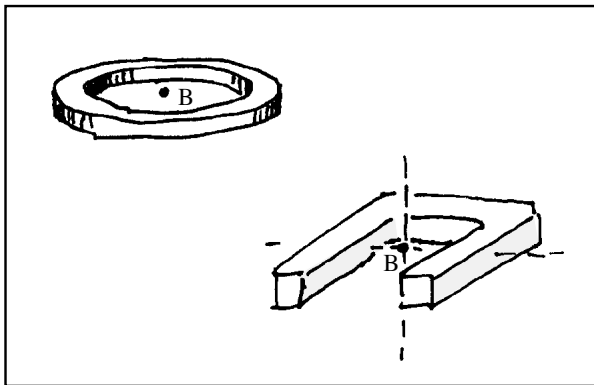


Fig. 7.44. In questi casi il baricentro si trova al di fuori del rispettivo oggetto.

Esercizi

1. Dov'è il baricentro di una ruota di bicicletta?
2. Dov'è il baricentro della Terra?
3. Prova a cercare il baricentro di diversi oggetti sollevandoli con il pollice e l'indice in modo che possano ruotare.
4. Possiamo immaginare la Terra e la Luna come un bilanciere: la "sbarra" tra i due corpi celesti è il campo gravitazionale. Dove si trova il baricentro? (Massa della Terra: circa 100 volte la massa della Luna, distanza Terra-Luna = 380 000 km).

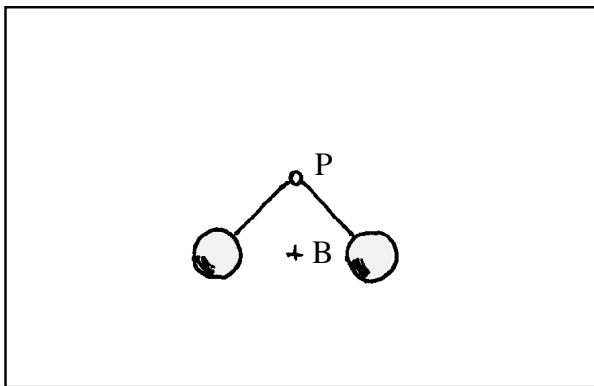


Fig. 7.45. Il fulcro non coincide con il baricentro. Il corpo è in equilibrio stabile.

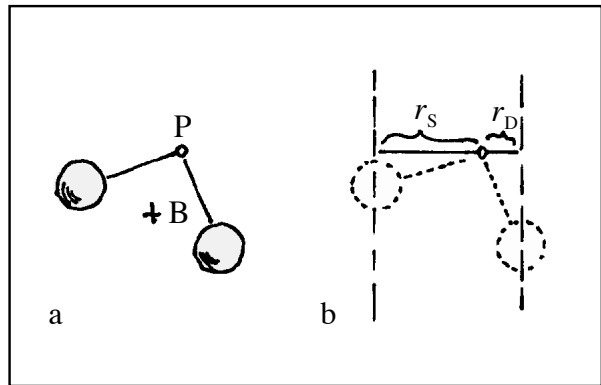


Fig. 7.46. (a) Il corpo non resta in questa posizione. (b) Un braccio della leva è più lungo dell'altro.

7.6 L'equilibrio stabile

Appendiamo un oggetto ma di proposito non scegliamo il baricentro come fulcro. Per semplicità prendiamo ancora un bilanciere. Per far sì che il fulcro e il baricentro non coincidano, il bilanciere viene piegato, fig. 7.45.

Cosa succede se il bilanciere è messo nella posizione mostrata in fig. 7.46a? Probabilmente il tuo intuito ti dice che non resta così: comincia a ruotare e si assesta nella posizione mostrata in fig. 7.45.

Ma non hai bisogno di affidarti all'intuito per giungere a questa conclusione. La fig. 7.46b mostra come il braccio della leva r_S sia più lungo di r_D . Visto che le sfere hanno la stessa massa, questo vuol dire che il momento meccanico sinistrorso è più grande del momento meccanico destrorso. Il bilanciere comincia quindi a ruotare in senso antiorario. Durante la rotazione, la lunghezza dei bracci della leva cambia. Quando il bilanciere raggiunge la posizione di fig. 7.45 i bracci hanno nuovamente la stessa lunghezza. È la *posizione di equilibrio*. Il bilanciere continua oltre la posizione di equilibrio, ma poco a poco si assesterà in quella posizione.

Cosa succede al baricentro in questo processo? Si muove verso il basso.

Se ruotiamo il corpo dalla posizione di equilibrio, l'altezza del baricentro aumenta, sia che si ruoti verso destra che verso sinistra. Nella posizione di equilibrio il baricentro è nel punto più basso che può raggiungere. Inoltre è esattamente sotto il fulcro.

Il bilanciere ha un'altra posizione di equilibrio: quando il baricentro è sulla verticale del fulcro, fig. 7.47. Se però lo muoviamo leggermente da questa posizione non tornerà nella sua posizione iniziale, al contrario se ne allontanerà sempre più e si assesterà nella posizione di equilibrio inferiore. La posizione di equilibrio in alto è *instabile*, quella in basso è *stabile*.

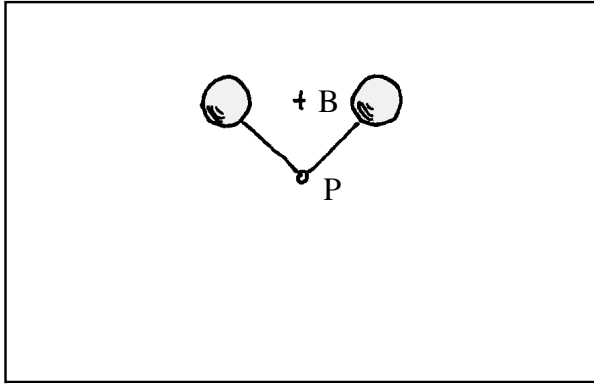


Fig. 7.47. Posizione di equilibrio instabile.

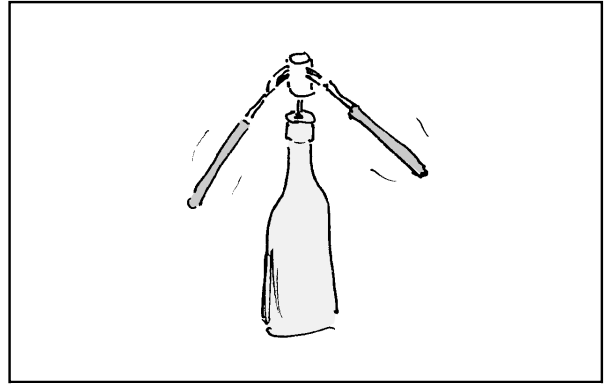


Fig. 7.49. Per l'esercizio 2

Un corpo è appeso, libero di ruotare. Se il fulcro si trova sulla verticale al di sopra del baricentro, il corpo è in equilibrio stabile. Se si ruota leggermente il corpo dalla posizione di equilibrio, esso torna spontaneamente ad assestarsi nella posizione iniziale.

Ora abbiamo a disposizione un comodo metodo per la determinazione del baricentro di un corpo. Appendiamo un corpo in un punto qualsiasi, fig. 7.48. Si assesterà nella posizione in cui il baricentro è esattamente sotto il fulcro. Conosciamo così una retta sulla quale deve trovarsi il baricentro. Lo appendiamo poi a un altro punto e aspettiamo che si fermi. Otteniamo un'altra retta che passa per il baricentro, che di conseguenza deve essere il punto di intersezione tra le due rette.

Esercizi

1. Cerca di trovare il baricentro di alcuni oggetti appendendoli, liberi di ruotare, consecutivamente in due punti.
2. Due forchette sono conficcate in un turacciolo a sua volta infilzato su un chiodo, fig. 7.49. Perché il turacciolo con le forchette non cade?

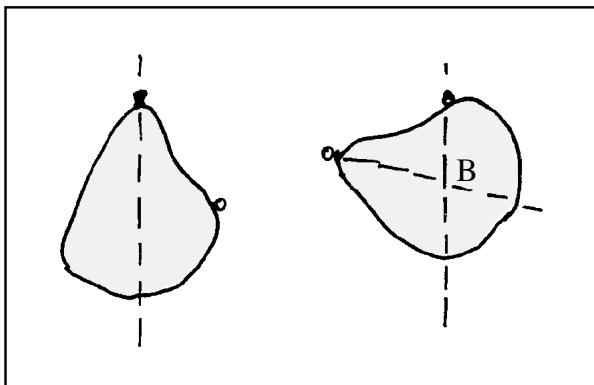


Fig. 7.48. Un corpo si assesta sempre in modo che il baricentro sia esattamente sotto il fulcro.

7.7 Baricentro e energia

Per spostare un corpo dalla sua posizione di equilibrio ci vuole energia. Ciò dipende dal fatto che il baricentro viene spostato verso l'alto.

È come quando si solleva un qualsiasi corpo, fig. 7.50. Anche in quel caso il baricentro viene spostato verso l'alto e anche in quel caso ci vuole energia.

Per spostare verso l'alto il baricentro di un corpo ci vuole energia.

Questa energia viene immagazzinata nel campo gravitazionale. Se il corpo torna a muoversi verso il basso, il campo gravitazionale la cede nuovamente.



Fig. 7.50. Per spostare verso l'alto il baricentro di un corpo ci vuole energia.

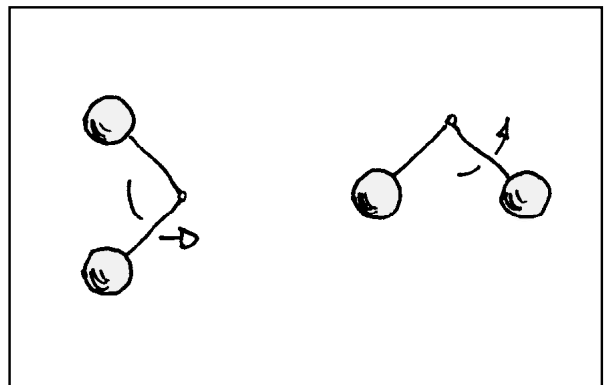


Fig. 7.51. Il processo a sinistra è spontaneo, quello a destra no.

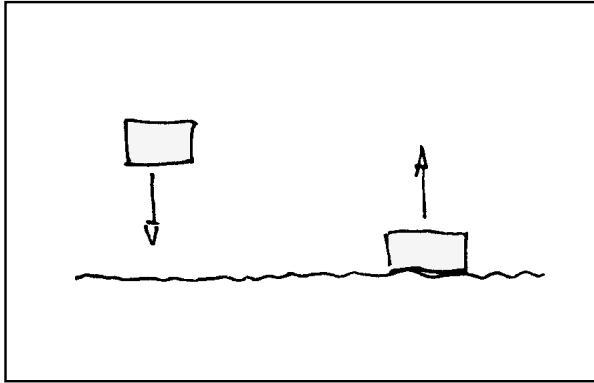


Fig. 7.52. Il processo a sinistra è spontaneo, quello a destra no.

Perché il processo a sinistra in fig. 7.51 è spontaneo e invece quello a destra no? Perché il processo a sinistra in fig. 7.52 è spontaneo e invece quello a destra no?

Perché è sempre più facile liberarsi dell'energia che riceverne. (Con l'energia è un po' come con i soldi.) L'energia liberata nella transizione alla posizione di equilibrio, è usata per creare calore. Questo processo però è irreversibile, il calore non si può annientare. Per questo motivo la transizione da equilibrio a non-equilibrio non è spontanea. Dobbiamo procurarci l'energia da qualche altra parte.

Esaminiamo la transizione all'equilibrio con un paio di esempi.

La sfera in fig. 7.53a rotola fino al punto più basso. In quel punto anche il baricentro ha la sua posizione più bassa. Il veicolo in fig. 7.53b si ferma quando è orizzontale. Per farlo le ruote a sinistra devono risalire, ma il baricentro si sposta comunque verso il basso. La cassa in fig. 7.54a non resta in questa posizione. Si ribalta sulla sinistra e il suo baricentro scende. Neanche l'oggetto in fig. 7.55a resta in quella posizione, in quanto il suo baricentro ha la possibilità di abbassarsi ancora di più, fig. 7.55b.

A volte è sufficiente sollevare di poco il baricentro di un corpo per portarlo in una posizione dalla quale scende spontaneamente molto più in basso. In altre

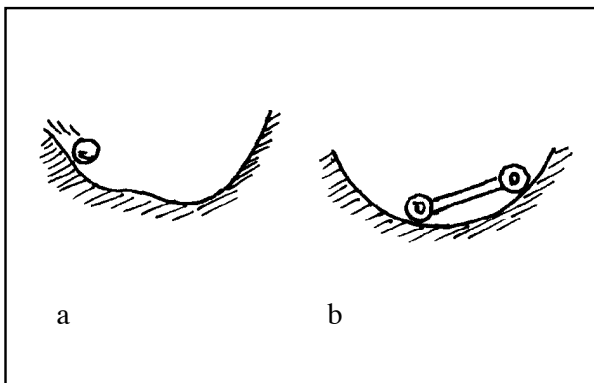


Fig. 7.53. (a) La sfera rotola fino al punto più profondo dell'avvallamento. (b) Il veicolo si assesta in modo da essere orizzontale.

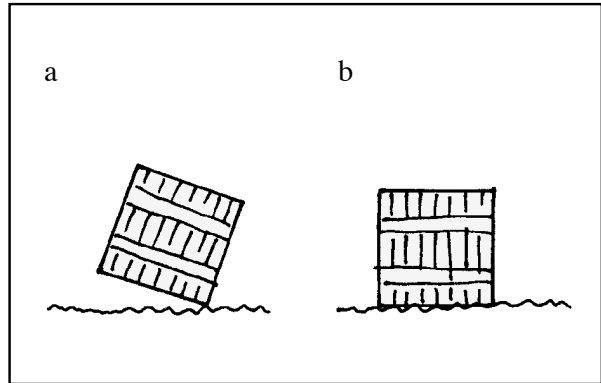


Fig. 7.54. La cassa si ribalta sulla sinistra. Il suo baricentro si sposta verso il basso.

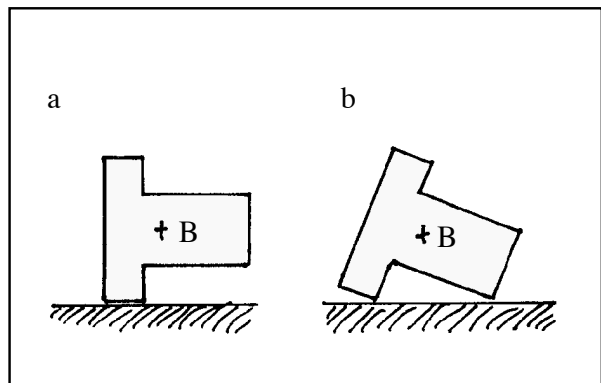


Fig. 7.55. L'oggetto si ribalta sulla destra perché così facendo il suo baricentro si abbassa.

parole: dobbiamo dare al corpo poca energia per poi ricavarne molta di più.

La fig. 7.56 mostra una situazione del genere. Ci vuole poca energia affinché la sfera superi il bordo, poi rotolerà spontaneamente lungo il fianco del monticello. Un altro esempio ben noto è mostrato in fig. 7.57. Anche qui il baricentro deve essere sollevato di poco affinché il vaso abbia una posizione dalla quale il baricentro può andare spontaneamente molto più in basso.

Abbiamo ottenuto un metodo per la determinazione della massa di un corpo. La fig. 7.58 mostra una

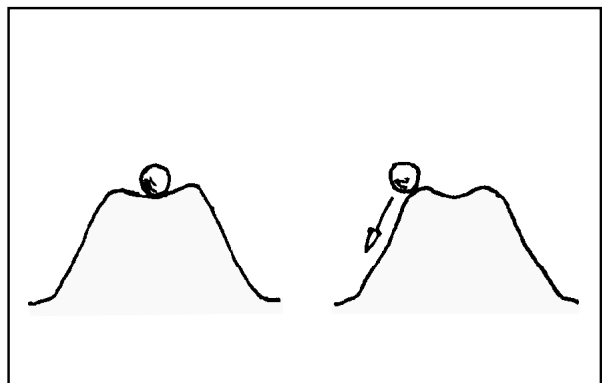


Fig. 7.56. Ci vuole pochissima energia per far rotolare la sfera oltre il bordo.

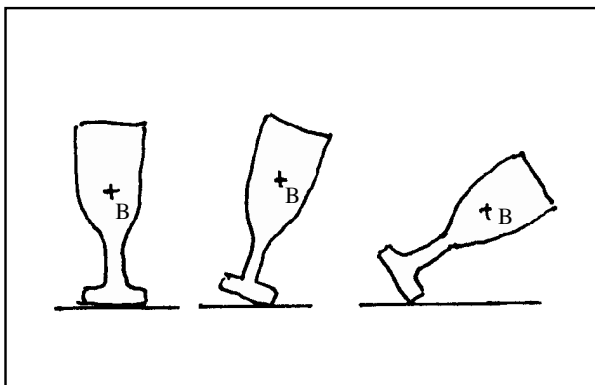


Fig. 7.57. Ci vuole pochissima energia per rovesciare il vaso.

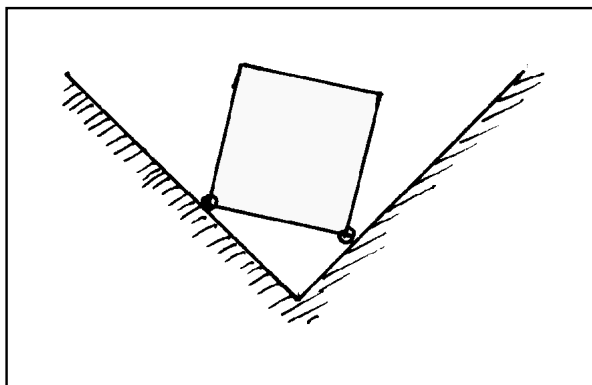


Fig. 7.59. Per l'esercizio 3

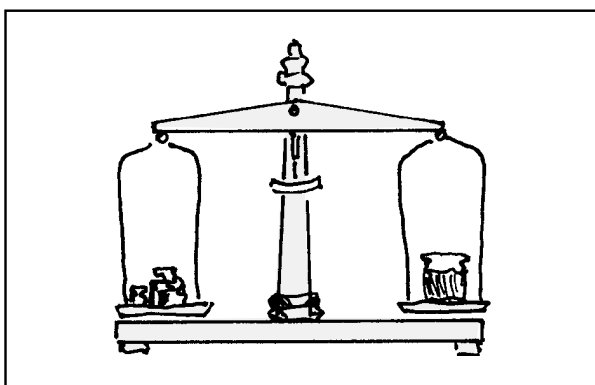


Fig. 7.58. Bilancia a piatti. Il fulcro centrale è un po' più in alto rispetto ai fulcri esterni.

vecchia bilancia a piatti. Il fulcro centrale del giogo è leggermente più in alto dei fulcri a cui sono appesi i piatti della bilancia.

Quando i piatti sono caricati allo stesso modo, la bilancia si assesta nella posizione con il giogo perfettamente orizzontale. Così il baricentro è più in basso possibile.

La bilancia comprende una pesiera: una serie di corpi dalle masse note, con cui si possono comporre i vari valori di massa - esattamente come con monete e banconote si compongono i vari importi in denaro.

Per pesare un oggetto lo mettiamo su uno dei piatti della bilancia. Sull'altro mettiamo dei pesi in modo che il giogo sia orizzontale. A quel punto sappiamo che la massa del corpo equivale alla massa totale dei pesi.

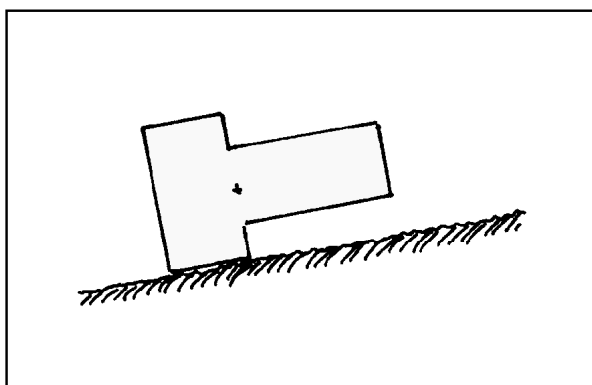


Fig. 7.60. Per l'esercizio 4

Esercizi

1. Se, spostando un corpo, il suo baricentro rimane alla stessa altezza, si dice che il corpo è in equilibrio indifferente. Il corpo resterà fermo nella posizione in cui viene messo. Fai degli esempi.
2. Una bicicletta non sta in piedi da sola, un'auto sì. Perché?
3. Il corpo in fig. 7.59 è in una posizione di equilibrio stabile? Se no - in che direzione si muoverà?
4. Si ribalta o no il corpo in fig. 7.60?
5. Alcune bilance hanno i bracci della leva diversi tra loro, fig. 7.61. I pesi vengono messi sul piatto appeso al braccio più lungo. Come si determina la massa dell'oggetto che si vuole pesare? Che vantaggio ha questa bilancia rispetto a una bilancia con i bracci della stessa lunghezza?

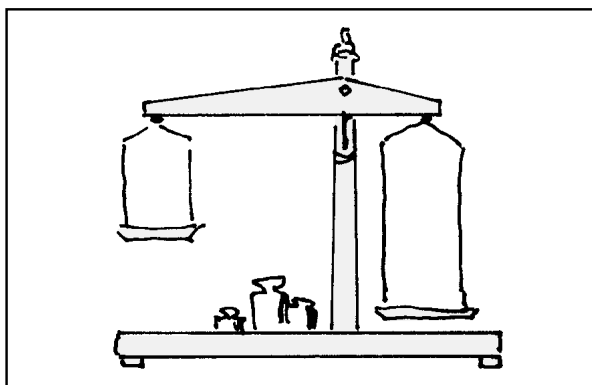


Fig. 7.61. Per l'esercizio 5

8. Quantità di moto angolare e correnti di quantità di moto angolare

In questo capitolo tratteremo un tipo particolare di moto: le rotazioni. Ti renderai conto che le rotazioni sono molto frequenti e particolarmente importanti.

Faremo una scoperta interessante: La descrizione delle rotazioni ha molte similitudini con la descrizione del moto rettilineo. Si può dire che c'è una *analogia* tra queste due aree della meccanica. Grazie a questa analogia potremo risparmiare molto tempo.

8.1 Quantità di moto angolare e velocità angolare.

Una ruota è montata su un albero motore, il motore è acceso, la ruota gira in modo regolare, fig. 8.1. Cosa si intende con "in modo regolare"? A velocità costante - dirai magari. Ma allora con che velocità? Il punto B vicino al bordo della ruota si muove in fretta, il punto A vicino al centro della ruota si muove adagio. Ciò significa che non c'è una velocità uniforme. Quello che cerchiamo è quindi un modo ragionevole di quantificare la velocità della rotazione. Questa misura è l'angolo "spazzato" da un raggio ogni secondo, fig. 8.2. Il quoziente tra l'angolo e il tempo necessario alla ruota per ruotare di quell'angolo, viene detto *velocità angolare*:

$$\text{velocità angolare} = \frac{\text{angolo}}{\text{intervallo di tempo}}$$

Per l'angolo esistono diverse unità di misura. Sicuramente il grado è quella che conosci meglio. Per noi però è più comodo prendere come unità un giro completo di 360° . Diamo quindi la velocità angolare in "giri al secondo".

Consideriamo una ruota libera di girare senza attrito. Per esempio la ruota di una bicicletta capovol-

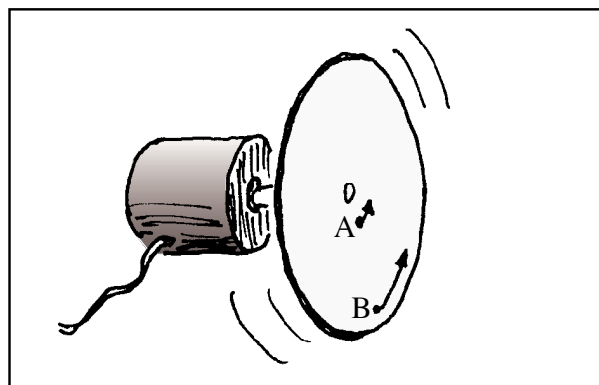


Fig. 8.1. Il punto B vicino al bordo della ruota si muove più in fretta del punto A.

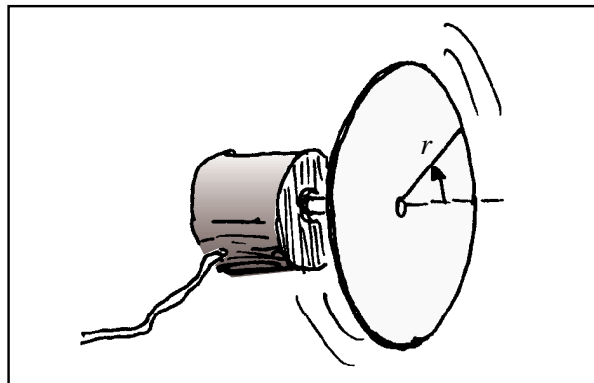


Fig. 8.2. La velocità angolare è il quoziente tra l'angolo spazzato dal raggio r e l'intervallo di tempo.

ta, fig. 8.3. Gira a una certa velocità angolare, compie cioè un certo numero di giri al secondo. Con un cronometro possiamo determinare il valore della velocità angolare. In questo modo descriviamo la rotazione della ruota.

La velocità angolare è per le rotazioni quello che la comune velocità è per i moti rettilinei. Per la descrizione dei moti rettilinei però, avevamo introdotto una seconda grandezza: la quantità di moto, una misura dello "slancio" di un corpo.

Allo stesso modo possiamo dire che anche la nostra ruota che gira ha slancio: qualcosa che si immette nella ruota quando la si fa girare e che ne fuoriesce nuovamente quando la ruota si ferma. Questo tipo di slancio viene detto *quantità di moto angolare*.

La quantità di moto angolare e la comune quantità di moto non sono la stessa cosa. Se la ruota in fig. 8.4a avesse della comune quantità di moto, dovrebbe muoversi come mostrato in fig. 8.4b.

Esaminiamo le caratteristiche della quantità di moto angolare. Da cosa dipende? Che percorso segue nei diversi processi?

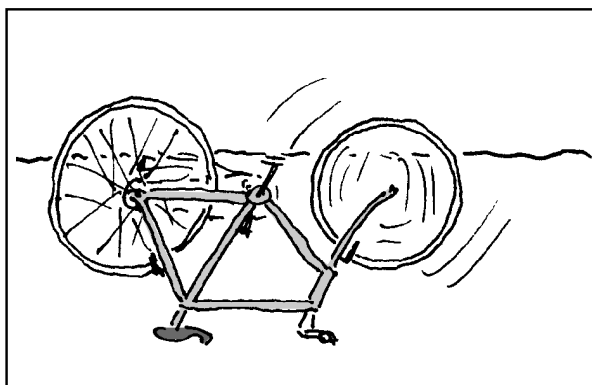


Fig. 8.3. La ruota che gira ha una determinata quantità di moto angolare.

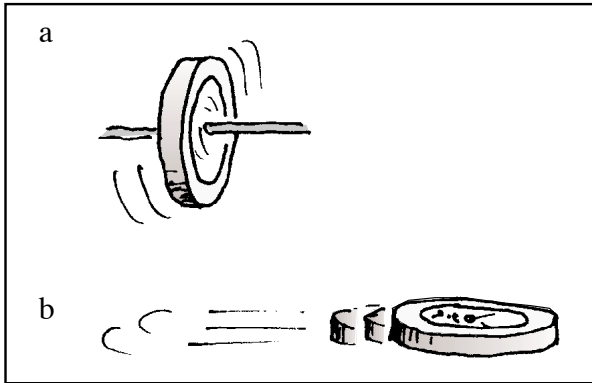


Fig. 8.4. (a) La ruota ha quantità di moto angolare. (b) La ruota ha comune quantità di moto

Due ruote identiche girano a velocità diverse (velocità angolari diverse), fig. 8.5. In quale ruota c'è più quantità di moto angolare (slancio)? Ovviamente in quella più veloce.

Più la velocità angolare di un corpo è grande, più quantità di moto angolare contiene.

Le due ruote in fig. 8.6 hanno la stessa forma ma sono fatte di materiali diversi, cosicché una è molto leggera e l'altra molto pesante. Vengono fatte girare alla stessa velocità. Quale contiene più quantità di moto angolare? Sicuramente la più pesante.

Più la massa di un corpo è grande, più quantità di moto angolare contiene.

Due corpi possono avere la stessa massa e girare alla stessa velocità e tuttavia contenere quantità di moto angolare diverse. Capiremo meglio come ciò sia possibile, quando avremo più dimestichezza con la quantità di moto angolare.

Eseguiamo un semplice esperimento, fig. 8.7. Abbiamo bisogno di due ruote - una con il mozzo fissato al tavolo e una che possiamo portare in giro. Le due ruote possono essere collegate tramite una specie di giunto a frizione. In quel caso una ruota trascina l'altra.

Inizialmente le ruote sono separate. Poi una viene fatta girare, l'altra no. Infine mettiamo in contatto i dischi della frizione. Cosa succede?

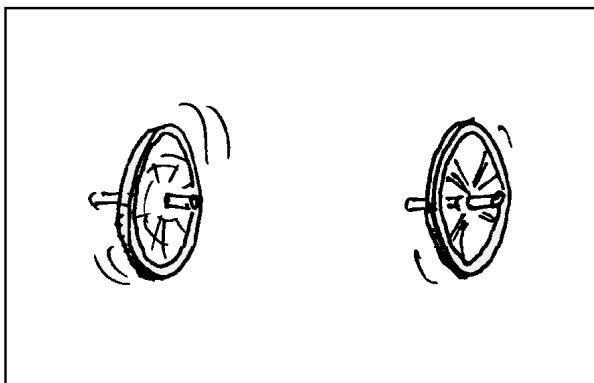


Fig. 8.5. Le ruote girano a velocità diverse. Quale ha più quantità di moto angolare?

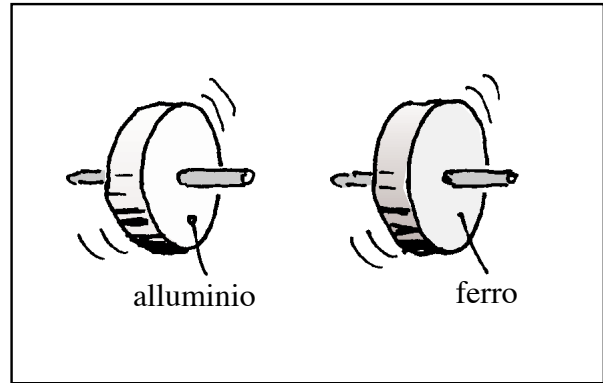


Fig. 8.6. Le ruote hanno la stessa forma ma masse diverse. Quale ha più quantità di moto angolare?

La ruota che gira, rallenta e l'altra, che all'inizio non girava, si mette a girare. Dopo che i dischi della frizione hanno scivolato l'uno sull'altro per un po' di tempo, le due ruote raggiungono la stessa velocità.

Questa è l'osservazione. Com'è la spiegazione? Cosa è successo alla quantità di moto angolare durante il processo?

La quantità di moto angolare contenuta nella ruota inizialmente in rotazione, è diminuita. La quantità di moto angolare della ruota inizialmente ferma, è aumentata. Da una ruota all'altra deve essere passata quantità di moto angolare.

La quantità di moto angolare può passare da un corpo a un altro.

La quantità di moto angolare che all'inizio era in una sola ruota, si è distribuita su entrambe le ruote.

La quantità di moto angolare si può distribuire su più corpi.

Prendiamo ancora una sola ruota, fissata al suo asse. L'asse è privo di attrito. La ruota viene fatta girare, viene caricata di quantità di moto angolare. Ora prendiamo in mano l'asse e "freniamo", fig. 8.8. Dopo un po' la ruota si ferma. Dov'è finita la quantità di moto angolare?

La situazione è simile a una che già conosci: un veicolo in moto rettilineo che frena. Esattamente come la quantità di moto del veicolo defluisce a terra,

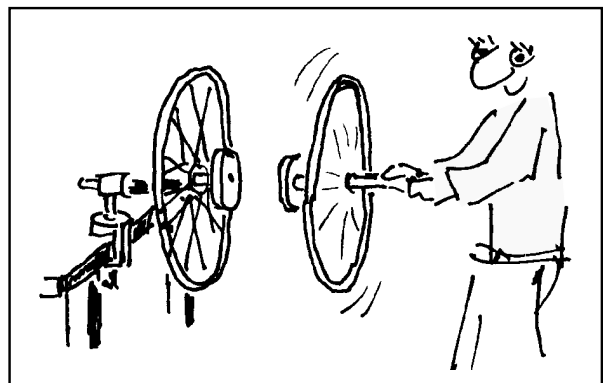


Fig. 8.7. Appena i dischi della frizione si toccano, comincia a fluire quantità di moto angolare dalla ruota destra verso quella sinistra.

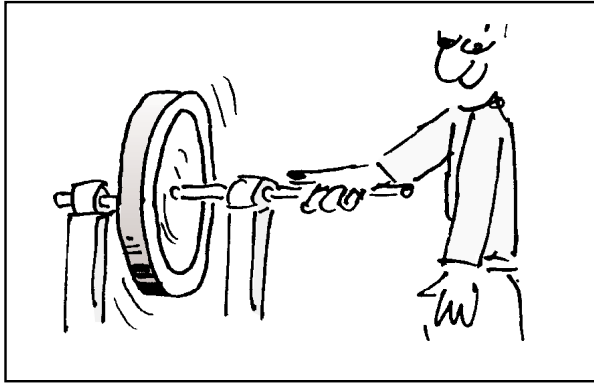


Fig. 8.8. La quantità di moto angolare defluisce a terra.

anche la quantità di moto angolare della ruota defluisce a terra.

Per altro, sarebbe successa la stessa cosa anche se non avessimo frenato la ruota di proposito. In quel caso la quantità di moto angolare sarebbe defluita a terra attraverso il supporto - però più lentamente.

Ora capisci a cosa servono i cuscinetti a sfera delle ruote: devono trattenere un asse senza che la quantità di moto angolare defluisca a terra.

Se una ruota non è priva di attrito e si ferma spontaneamente, allora la sua quantità di moto angolare defluisce a terra.

Torniamo all'esperimento con due ruote, fig. 8.7. Facciamo girare la ruota fissata al tavolo. Poi facciamo girare anche l'altra - ma in direzione opposta. Facciamo in modo che il numero di giri al secondo sia lo stesso per le due ruote.

Colleghiamo nuovamente le ruote con il giunto a frizione. Qual è la situazione finale? Entrambe le ruote sono ferme. Come si spiega? Prima c'era della quantità di moto angolare. Dov'è finita?

All'inizio ogni ruota aveva una quantità di moto angolare diversa da zero. Se però alla quantità di moto angolare di una ruota diamo il segno opposto che alla quantità di moto angolare dell'altra, allora già all'inizio la quantità di moto angolare totale era zero. Dall'esperimento concludiamo:

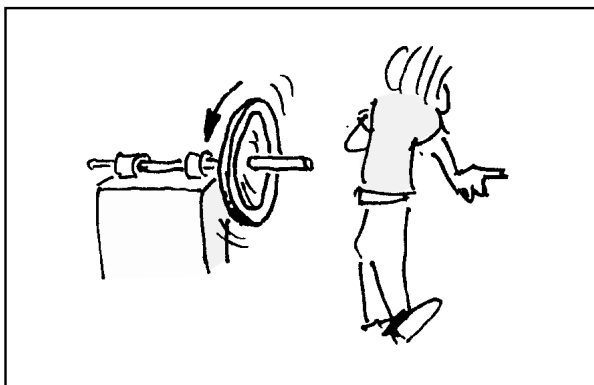


Fig. 8.9. La regola della mano destra.

La quantità di moto angolare può assumere valori positivi e negativi.

Possiamo scegliere arbitrariamente quale delle quantità di moto angolare ha segno positivo e quale negativo. Come facciamo? Una possibilità molto pratica è la *regola della mano destra*, fig. 8.9:

Pieghiamo le dita della mano destra in modo che puntino nella direzione della rotazione. Se il pollice punta nella direzione x positiva, la quantità di moto angolare è positiva, se punta nella direzione x negativa, la quantità di moto angolare è negativa.

Esercizio

Cerca nel paragrafo 3.2 di questo libro le frasi in grassetto che corrispondono alle frasi in grassetto di questo paragrafo. Mettile a confronto in una tabella.

8.2 Pompe di quantità di moto angolare

La quantità di moto angolare defluisce spontaneamente da una ruota che gira: attraverso i mai perfetti cuscinetti a sfera, defluisce a terra. Per dare quantità di moto angolare a una ruota, invece, si deve fare uno sforzo. Una ruota non comincia a girare da sola.

Si può caricare di quantità di moto angolare una ruota facendola girare a mano, per esempio con una manovella, o si può lasciare che se ne incarichi un motore, fig. 8.10.

In entrambi i casi ci vuole qualcosa che forzi il trasferimento di quantità di moto angolare: una *pompa di quantità di moto angolare*. Nel primo caso è la persona che funge da pompa di quantità di moto angolare, nel secondo è il motore.

Ma la pompa da dove prende la quantità di moto angolare? È come per la quantità di moto: anche la quantità di moto angolare può essere presa da terra. Un esperimento lo dimostra chiaramente.

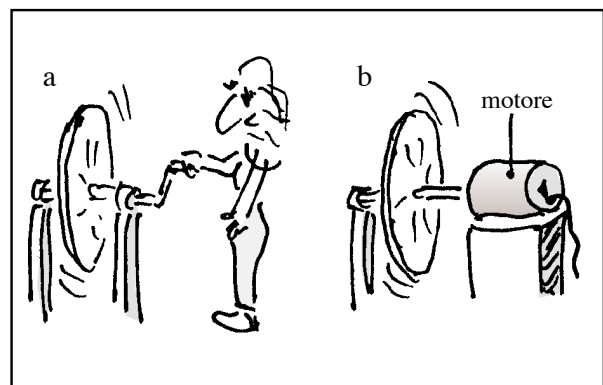


Fig. 8.10. (a) La persona lavora come pompa di quantità di moto angolare. (b) Il motore lavora come pompa di quantità di moto angolare.

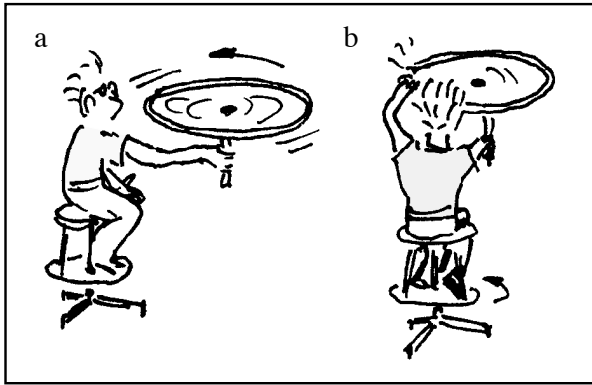


Fig. 8.11. (a) Solo la ruota ha quantità di moto angolare. (b) Dalla ruota fluisce quantità di moto angolare alla persona e allo sgabello.

Fissiamo l'asse x verticalmente verso l'alto. Abbiamo bisogno di uno sgabello girevole e di una ruota abbastanza grande, priva di attrito e che possa essere comodamente tenuta per il mozzo. La persona sta in piedi accanto allo sgabello tenendo in mano la ruota in modo che il suo asse sia verticale e la fa girare. Poi si siede sullo sgabello, fig. 8.11, e frena la ruota fino a fermarla. A questo punto, osserviamo che così facendo, la persona e lo sgabello cominciano a girare. La spiegazione di quanto osservato: durante la frenata la quantità di moto angolare della ruota è defluita alla persona e allo sgabello - ma non oltre. Non è potuta defluire a terra perché lo sgabello girevole è isolato da terra.

Se la persona appoggia un piede a terra mentre frena la ruota, la quantità di moto angolare può defluire direttamente a terra.

Ora una variante dell'esperimento. La persona è seduta sullo sgabello e tiene in mano la ruota, fig. 8.12. Sgabello girevole e ruota sono fermi. Poi la ruota viene messa in rotazione dalla persona. Cosa succede? Anche lo sgabello con la persona sopra comincia a girare - però in senso opposto alla rotazione della ruota.

Evidentemente la persona ha pompato quantità di moto angolare da sé stessa e dallo sgabello nella ruota. Ora, la persona e lo sgabello hanno quantità di moto angolare negativa.

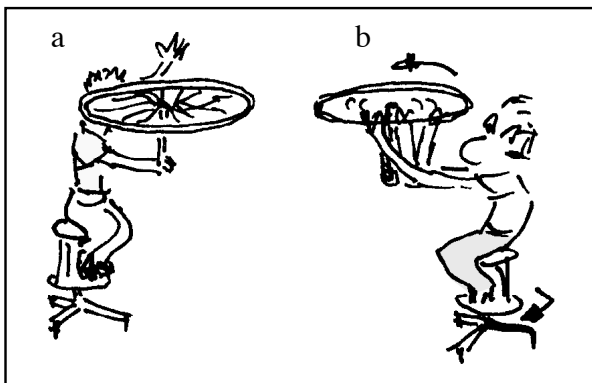


Fig. 8.12. (a) Ruota, persona e sgabello senza quantità di moto angolare. (b) Dalla persona e dallo sgabello, la quantità di moto angolare viene pompata nella ruota.

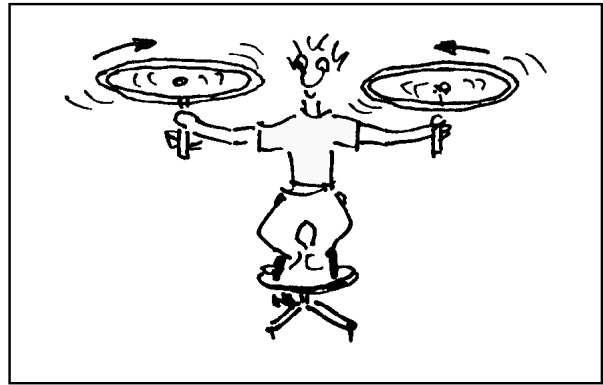


Fig. 8.13. Per l'esercizio

Se la persona appoggia un piede a terra mentre carica la ruota lo sgabello non gira. In questo caso la quantità di moto angolare è stata pompata nella ruota direttamente da terra.

Esercizio

La persona in fig. 8.13 tiene in ogni mano una ruota che gira attorno a un asse di rotazione verticale. Le ruote sono di identica fattura. Le loro velocità angolari hanno lo stesso modulo ma le direzioni di rotazione sono opposte. Mentre è seduta sullo sgabello la persona frena contemporaneamente le due ruote. Cosa succede? Cosa succederebbe frenando due ruote che prima giravano nella stessa direzione?

8.3 Il volano

Una ruota che gira contiene quantità di moto angolare. È un contenitore di quantità di moto angolare. Alcune ruote servono al solo scopo di immagazzinare quantità di moto angolare. Sono dette *volani*.

A cosa servono i volani? Le macchine a vapore e i motori a scoppio (i motori di automobile) non pompano quantità di moto angolare con regolarità, lo fanno a intermittenza. Il motore di un'auto produce circa 50 impulsi di quantità di moto angolare al secondo. Tra questi impulsi ci sono dei brevi intervalli di tempo in cui il motore non "pompa". Per superare questi tempi morti, cioè per non fermarsi, ha un volano. Mentre il motore lavora una parte della quantità di moto angolare va nel volano, durante il tempo morto una parte torna fuori. In questo modo l'albero di trasmissione fornisce una corrente di quantità di moto angolare più o meno regolare.

Come possiamo stipare il massimo di quantità di moto angolare in un volano? Abbiamo già visto: un corpo contiene tanta più quantità di moto angolare, quanto più veloce gira e quanto più è pesante. Quindi: un volano deve girare velocemente e avere una grande massa.

Descriviamo ora un metodo molto semplice ma un po' grossolano per confrontare le quantità di moto angolari. Il corpo da esaminare ruota attorno a un asse privo di attrito, fig. 8.14. Prendiamo l'asse tra pollice e indice e freniamo il più possibile. Passa un

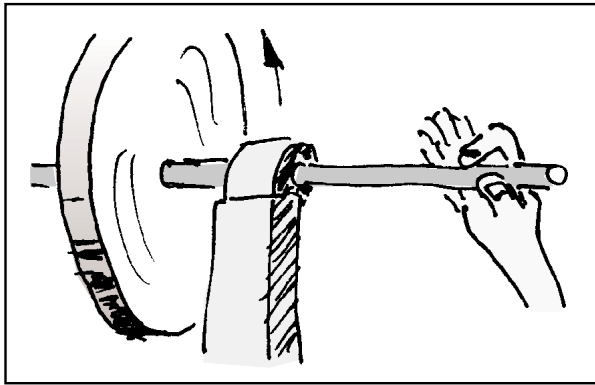


Fig. 8.14. Più tempo ci vuole per frenare la rotazione del corpo, più quantità di moto angolare contiene.

certo tempo prima che il corpo si fermi. Più quantità di moto angolare ha il corpo, più tempo ci vuole affinché tutta la quantità di moto angolare defluisca.

Confrontiamo ora di volta in volta due corpi in rotazione.

1. I corpi sono di identica fattura. Uno gira velocemente, l'altro lentamente. Ovviamente ci vuole più tempo per fermare quello veloce che per quello lento, in quanto il corpo veloce contiene più quantità di moto angolare di quello lento.

2. I corpi ruotano alla stessa velocità ma hanno masse diverse. Ci vuole più tempo per fermare quello pesante che per quello leggero, in quanto quello pesante aveva più quantità di moto angolare di quello leggero.

3. Confrontiamo ancora due corpi che non si differenziano né per la massa né per la velocità angolare. L'unica differenza è che in uno una parte della massa sta più all'esterno che nell'altro, fig. 8.15. Il risultato è inequivocabile: la frenata dura più a lungo per il corpo con le masse più all'esterno. Di conseguenza doveva contenere più quantità di moto angolare dell'altro.

Abbiamo trovato un'altra relazione:

Più la massa di un corpo è distribuita all'esterno, più quantità di moto angolare contiene.

Questa è una regola da tener presente nella costruzione dei volani: la massa deve stare il più all'ester-

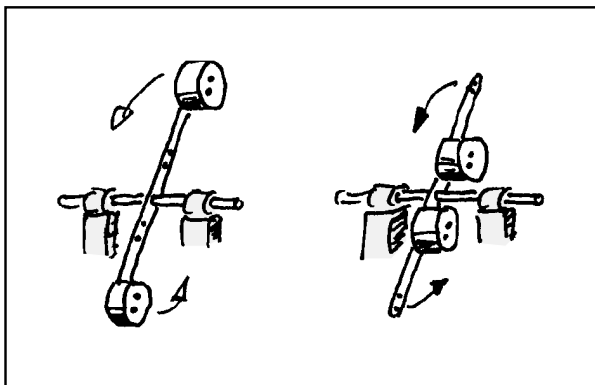


Fig. 8.15. Il corpo la cui massa è più all'esterno ha più quantità di moto angolare.

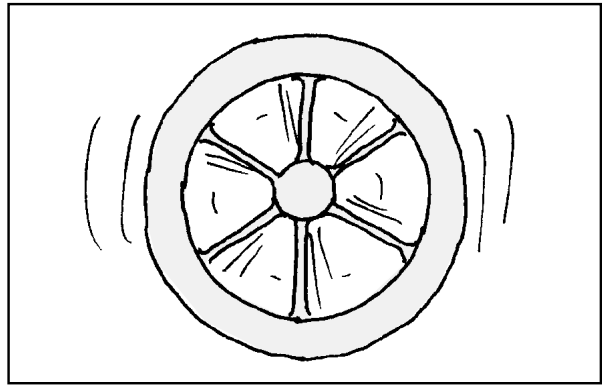


Fig. 8.16. Volano. I raggi sostengono un pesante anello.

no possibile. Un volano che può immagazzinare molta quantità di moto angolare ha il seguente aspetto: un grande anello pesante fissato al mozzo con dei raggi sottili, fig. 8.16.

Esercizi

1. Le ruote hanno svariate funzioni. Immagazzinare quantità di moto angolare è solo una di loro. A cos'altro servono le ruote? Elenca alcuni usi differenti.
2. Cita alcuni esempi di applicazione del volano.
3. Non è possibile immagazzinare in un volano una quantità di moto angolare sempre più grande semplicemente facendolo girare più in fretta. Perché?

8.4 Conduttori di quantità di moto angolare

La fig. 8.17 mostra come si può caricare un volano di quantità di moto angolare. Il motore prende da terra la quantità di moto angolare e la fa fluire al volano attraverso l'albero motore. Possiamo concludere che gli alberi motore servono al trasporto della quantità di moto angolare, sono dei conduttori di quantità di moto angolare.

Qual è la caratteristica dell'albero motore che ne fa un conduttore di quantità di moto angolare? Di che

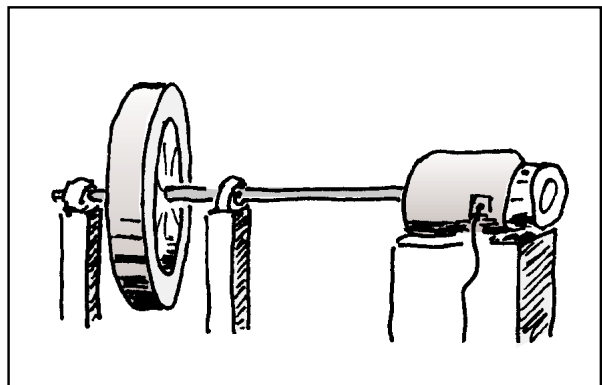


Fig. 8.17. La quantità di moto angolare fluisce dal motore al volano attraverso l'albero motore.

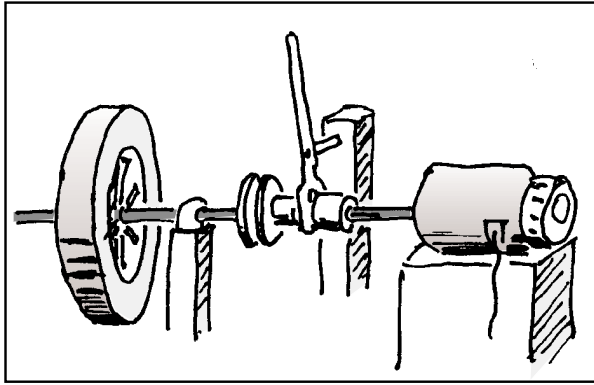


Fig. 8.18. Il collegamento tra motore e volano può essere interrotto dalla frizione.

materiale devono essere fatti? L'unica condizione è che il materiale sia rigido. Una qualsiasi sbarra rigida può essere usata come conduttore di quantità di moto angolare.

I materiali rigidi conducono la quantità di moto angolare.

Analizziamo qualche altro meccanismo che riguarda il trasporto di quantità di moto angolare.

Un cuscinetto a sfera serve a trattenere un albero motore senza che la quantità di moto angolare defluisca a terra.

I cuscinetti a sfera fungono da isolatori di quantità di moto angolare.

La fig. 8.18 mostra una frizione. Con una leva possiamo interrompere e ripristinare il collegamento tra motore e volano.

Con una frizione si può interrompere il conduttore di quantità di moto angolare.

Ogni auto ha una frizione. Si trova fra il cambio e il motore, fig. 8.19. Schiacciando il pedale della frizione (quello più a sinistra) la si "stacca", il collegamento tra motore e cambio viene interrotto.

Si deve staccare prima di "cambiare marcia", cioè prima di cambiare l'ingranaggio di trasmissione. Se cambiamo senza staccare la frizione e lasciamo che l'intensa corrente di quantità di moto angolare fluisca dal motore alle ruote, il cambio si danneggia.

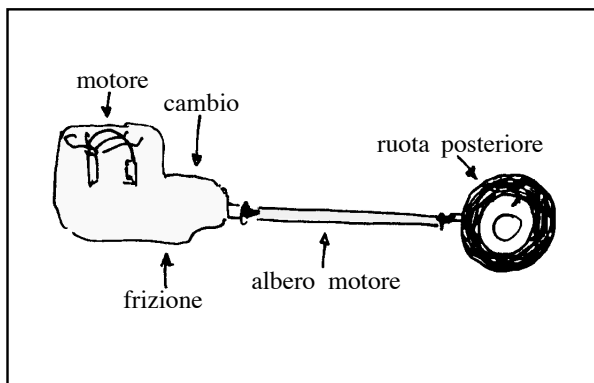


Fig. 8.19. Parte del motore di un'auto.

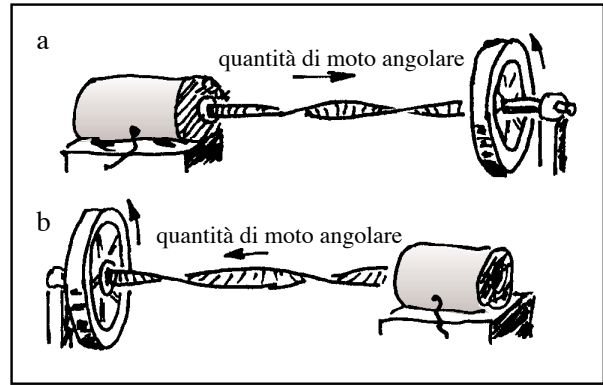


Fig. 8.20. (a) La quantità di moto angolare fluisce da sinistra verso destra. (b) La quantità di moto angolare fluisce da destra verso sinistra.

Facciamo fluire quantità di moto angolare in un volano attraverso un albero motore. Fa differenza per l'albero se la corrente di quantità di moto angolare fluisce o no? E fa differenza se fluisce da sinistra verso destra o da destra verso sinistra?

Osservando l'albero motore non notiamo differenze, perlomeno non se l'albero è spesso. Usiamo allora come albero motore un oggetto elastico, pieghevole, per esempio un righello di plastica, fig. 8.20a. Come reagisce il righello quando è attraversato da una corrente di quantità di moto angolare? Si torce perché è sottoposto a una determinata tensione. Diciamo che è sottoposto a *torsione*. Anche se in un oggetto rigido non si vede nessuna deformazione quando è attraversato da una corrente di quantità di moto angolare, l'oggetto è sottoposto a torsione.

La direzione della torsione dipende solo dalla direzione in cui fluisce la quantità di moto angolare. In fig. 8.20a la ruota è caricata con quantità di moto angolare positiva, la quantità di moto angolare fluisce nel righello da sinistra a destra.

Anche nella ruota in fig. 8.20b affluisce quantità di moto angolare positiva. In questo caso proviene da destra, fluisce quindi da destra verso sinistra. In cosa si distinguono i due righelli?

I bordi del righello formano una spirale. Come forse saprai ci sono due tipi di spirale: spirali destrorse e sinistrorse, fig. 8.21. Una spirale destrorsa è come quella di un cavatappi o di una normale filettatura. Una spirale sinistrorsa è quella di un cavatappi guardato allo specchio.

Torniamo alle nostre correnti di quantità di moto angolare. In fig. 8.20a la quantità di moto angolare fluisce da sinistra verso destra. Il righello si torce in una spirale sinistrorsa. In fig. 8.20b la quantità di moto angolare fluisce da destra verso sinistra. Il righello si torce in una spirale destrorsa.

Una corrente di quantità di moto angolare verso destra causa una torsione sinistrorsa;

Una corrente di quantità di moto angolare verso sinistra causa una torsione destrorsa.

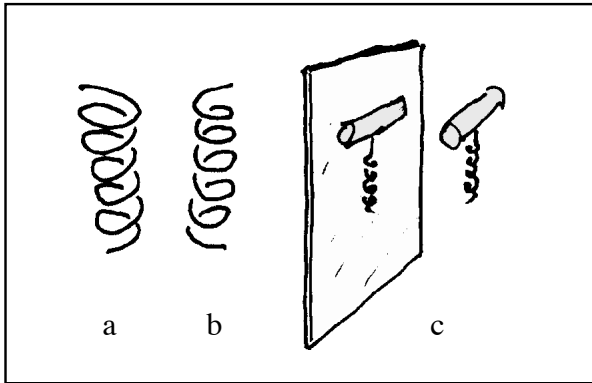


Fig. 8.21. (a) Spirale destrorsa. (b) Spirale sinistrorsa. (c) Cavatappi e sua immagine allo specchio

Esercizi

1. Progetta un esperimento per scoprire se l'acqua conduce la quantità di moto angolare.
2. Progetta un esperimento per dimostrare che i campi magnetici conducono la quantità di moto angolare.
3. L'aria conduce malissimo la quantità di moto angolare. Descrivi un esperimento, o cita un apparecchio, per dimostrare che l'aria un po' di quantità di moto angolare la conduce comunque.
4. Gli alberi motore sono conduttori di quantità di moto angolare. In un'auto ce ne sono parecchi. Hanno nomi diversi che dipendono dalla loro funzione. Cita alcuni alberi motore di un'auto. A cosa servono?
5. Perché certi alberi motore sono spessi e altri sottili?

8.5 Circuiti di quantità di moto angolare

Un macinacaffè è fatto come mostra la fig. 8.22. Uno vero è fatto in modo più compatto ma in sostanza ha questo aspetto.

La macina è azionata da un motore elettrico. Il motore pompa quantità di moto angolare alla macina attraverso un albero motore. La quantità di moto angolare della macina aumenta? No, altrimenti dovrebbe girare sempre più in fretta e non lo fa.

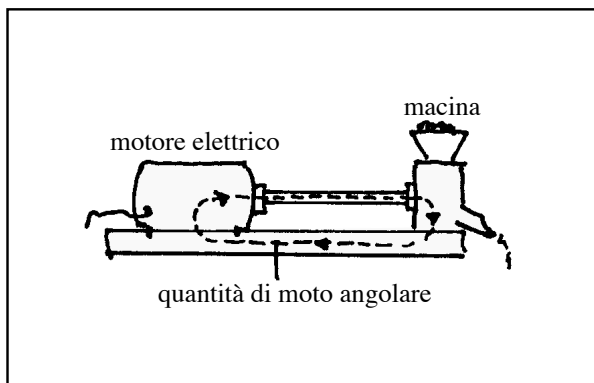


Fig. 8.22. Macinacaffè. La quantità di moto angolare fluisce in circuito chiuso.

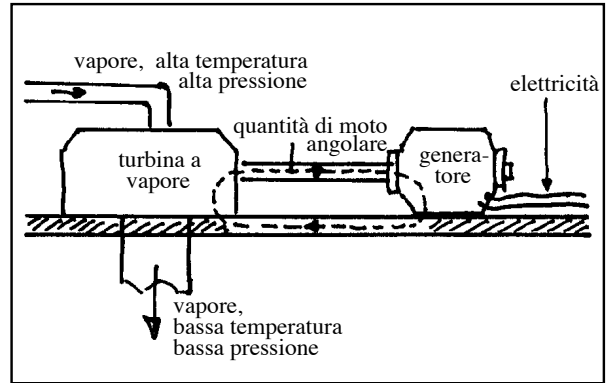


Fig. 8.23. Turbina e generatore di una centrale elettrica. La quantità di moto angolare fluisce in circuito chiuso.

Allora cosa succede alla quantità di moto angolare? Deve necessariamente defluire dalla macina. Niente di sorprendente. Dopotutto, tra la parte interna girevole della macina e la parte esterna fissa c'è molto attrito; e l'attrito è come un cattivo cuscinetto, cioè un cuscinetto dal quale la quantità di moto angolare defluisce facilmente.

Quindi ci troviamo di fronte a un circuito chiuso di quantità di moto angolare: il motore pompa quantità di moto angolare dal basamento della macchina alla macina attraverso l'albero motore. Da lì passa al telaio del macinino e torna al motore attraverso il basamento.

Naturalmente sia il motore che il macinino devono essere saldamente fissati al basamento.

La turbina e il generatore di una centrale elettrica sono in una situazione molto simile, fig. 8.23.

In fig. 8.24a qualcuno sta perforando una tavola. La quantità di moto angolare fluisce da terra, attraverso l'uomo e il trapano, alla tavola e da lì torna a terra attraverso la morsa.

La fig. 8.24b mostra cosa succede se il circuito di corrente di quantità di moto angolare non è chiuso. La tavola è stata tolta dalla morsa. La quantità di moto angolare non può più defluire. Il motore gira a vuoto, non pompa più. La tavola gira, ma non più in fretta, vale a dire che alla tavola non giunge più nuova quantità di moto angolare.

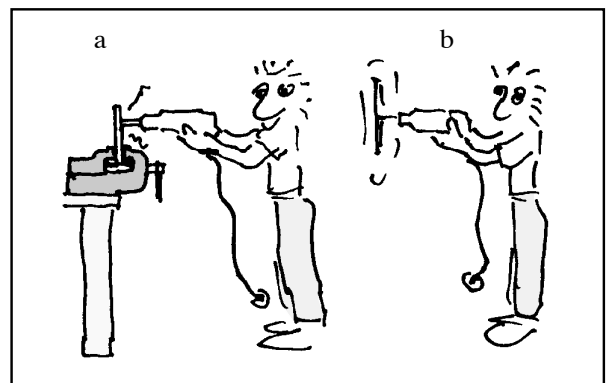


Fig. 8.24. (a) Il circuito di quantità di moto angolare è chiuso. (b) Il circuito di quantità di moto angolare è interrotto.

Esercizi

1. Che percorso segue la quantità di moto angolare in un ventilatore?
2. Qualcuno tempera una matita. Che percorso segue la quantità di moto angolare?

8.6 La quantità di moto angolare come portatore di energia

Esaminiamo di nuovo il macinacaffè - ma da un altro punto di vista: facciamo un bilancio energetico. Il motore riceve energia e la trasmette alla macina. Quali sono i portatori di energia? Al motore l'energia arriva con il portatore elettricità.

Ormai ti sarà chiaro come andare avanti. Tra motore e macina, oltre all'energia fluisce anche quantità di moto angolare. Quindi il portatore di energia dev'essere la quantità di moto angolare, fig. 8.25.

La quantità di moto angolare è un portatore di energia.

In altre parole: nel motore l'energia viene trasferita dal portatore elettricità al portatore quantità di moto angolare. Con la quantità di moto angolare va dal motore alla macina, dove viene scaricata dalla quantità di moto angolare che torna al motore attraverso il basamento. La fig. 8.26 mostra il diagramma di flusso di una centrale idroelettrica.

Infine, facciamo il bilancio della quantità di moto angolare e dell'energia, per un volano. Il volano in fig. 8.27 viene caricato di quantità di moto angolare: il motore pompa quantità di moto angolare da terra al volano attraverso l'albero motore.

Nel frattempo abbiamo scoperto che nell'albero non passa solo quantità di moto angolare ma anche energia. Dove va questa energia? Visto che non può uscire dal volano, l'energia vi si accumula. Quindi il volano non immagazzina solo quantità di moto angolare ma anche energia.

Con un volano in rotazione, cioè con un volano che è stato caricato di quantità di moto angolare e di energia, possiamo azionare qualcosa, per esempio una dinamo, fig. 8.28.

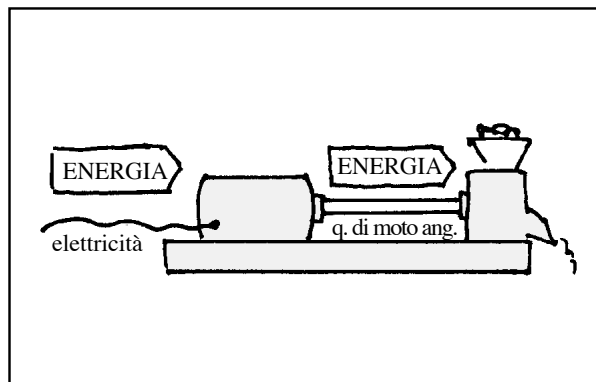


Fig. 8.25. L'energia giunge dal motore alla macina con il portatore quantità di moto angolare

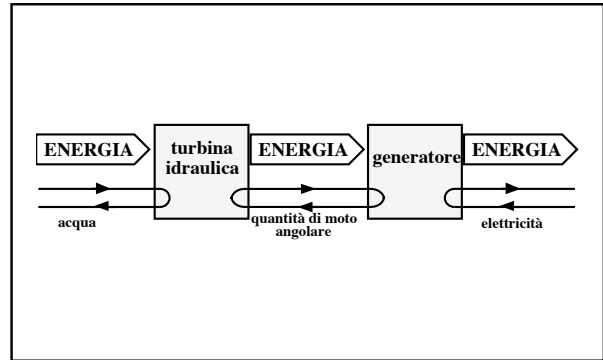


Fig. 8.26. Diagramma di flusso di una centrale idroelettrica.

Probabilmente avrai già visto un'automobilina giocattolo azionata a volano: le si dà una forte spinta sul pavimento. Il volano si carica di quantità di moto angolare e energia, con la quale l'automobilina percorre qualche metro da sola.

Esercizi

1. Disegna i diagrammi di flusso di una turbina idraulica, di un mulino a vento, di una pompa idraulica e di un'elica di ventilatore.
2. Cita delle sorgenti di energia che forniscono energia con il portatore quantità di moto angolare. Da cosa le si riconosce?
3. Cita dei ricevitori di energia che la ricevono con il portatore quantità di moto angolare.
4. Da cosa si riconoscono gli apparecchi che ricevono energia dall'uomo con il portatore quantità di moto angolare?

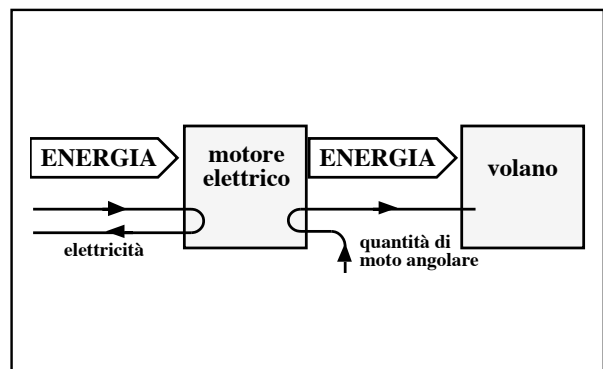


Fig. 8.27. Un volano viene caricato con quantità di moto angolare e energia.

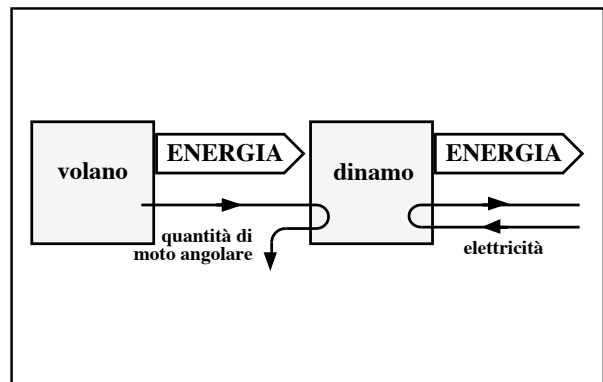


Fig. 8.28. Volano che aziona una dinamo.

9. Compressione e trazione

9.1 La relazione tra pressione e intensità della corrente di quantità di moto

Un blocco K è incastrato tra due pareti da una molla M, fig. 9.1. Una corrente di quantità di moto fluisce attraverso il dispositivo. La corrente di quantità di moto è sempre associata al fatto che il conduttore della corrente è sottoposto a *tensione meccanica*: a trazione o a compressione. Ti ricordi la nostra regola: corrente di quantità di moto verso destra significa compressione, corrente di quantità di moto verso sinistra significa trazione.

Vogliamo analizzare la tensione nel blocco. Visto che la corrente di quantità di moto è distribuita su tutto il blocco, ogni sua parte è sottoposta a compressione; ogni parte "sente" la pressione, fig. 9.2.

Confrontiamo i due blocchi K1 e K2 in fig. 9.3. Visto che le molle sono identiche, la corrente di quantità di moto ha la stessa intensità - poniamo $200 \text{ Hy/s} = 200 \text{ N}$. Il blocco K2 ha una sezione più grande di K1. Quindi, la corrente di quantità di moto si distribuisce su una superficie più grande. L'intensità della corrente di quantità di moto per unità di superficie è di conseguenza più piccola. Attraverso ogni centimetro quadrato della sezione di K1 fluiscono

$$\frac{200}{25} \text{ Hy/s} = 8 \text{ N}$$

Attraverso ogni centimetro quadrato della sezione di K2 fluiscono

$$\frac{200}{100} \text{ Hy/s} = 2 \text{ N}$$

Un pezzo di materia di K1 "sente" una pressione maggiore che un pezzo di materia di K2.

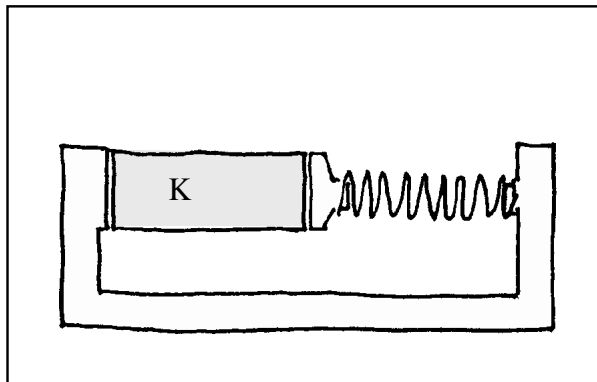


Fig. 9.1. Il blocco K è sottoposto a compressione.

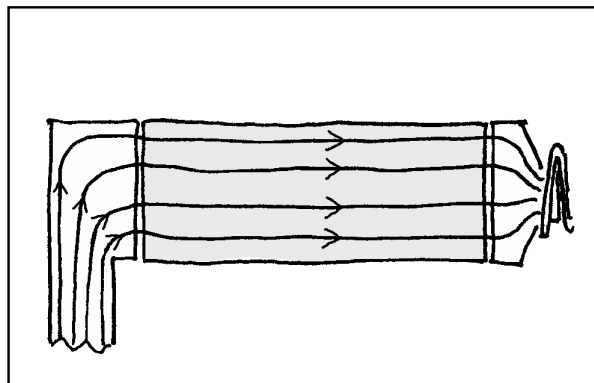


Fig. 9.2. La corrente di quantità di moto si distribuisce su tutta la sezione del blocco.

Concludiamo: l'intensità della corrente di quantità di moto per unità di superficie può essere usata per caratterizzare la tensione meccanica in un punto qualsiasi all'interno di un corpo. Questa grandezza, cioè il quoziente tra l'intensità della corrente di quantità di moto e la superficie attraversata dalla corrente, viene detta pressione. È la stessa grandezza fisica che avevamo già conosciuto in altro modo.

Visto che per la pressione si usa la lettera p , possiamo scrivere:

$$p = \frac{F}{A}$$

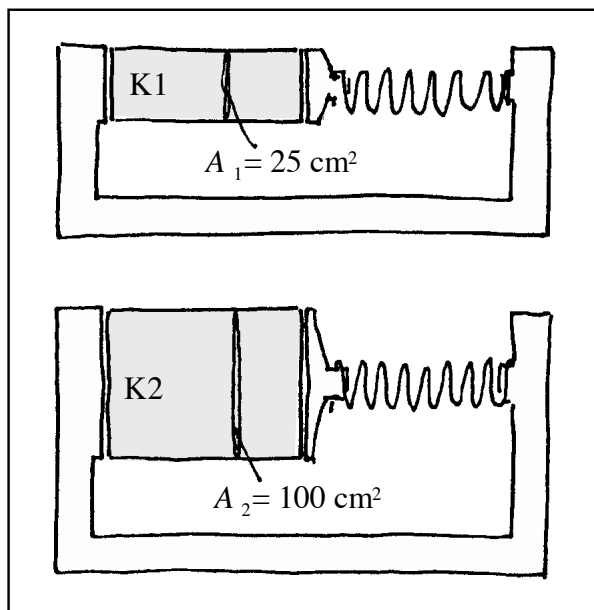


Fig. 9.3. Le correnti di quantità di moto in K1 e K2 hanno la stessa intensità. L'intensità della corrente di quantità di moto per superficie, cioè la pressione, è maggiore in K1.

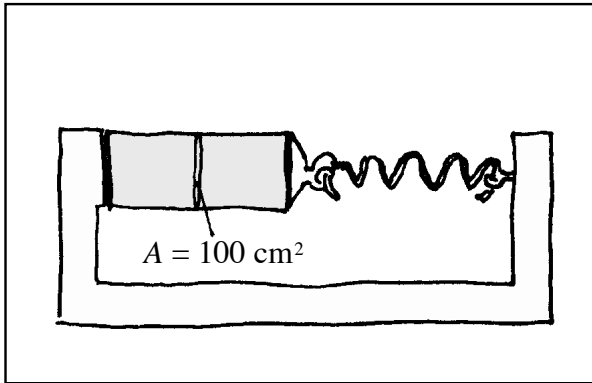


Fig. 9.4. Il blocco è sottoposto a trazione, la pressione è negativa.

Se l'intensità della corrente di quantità di moto viene data in N e l'area in m^2 , per la pressione otteniamo l'unità di misura N/m^2 . Questa unità di misura è chiamata pascal, abbreviato in Pa. Quindi

$$Pa = \frac{N}{m^2}$$

1 Pa è una pressione molto piccola. Si usano spesso le unità più grandi

$$1 \text{ kPa} = 1 \text{ 000 Pa}$$

e

$$1 \text{ MPa} = 1 \text{ 000 000 Pa},$$

oppure il bar:

$$1 \text{ bar} = 100 \text{ 000 Pa}.$$

Torniamo al nostro blocco. Nel blocco K1 c'è una pressione, o più precisamente una tensione di compressione, di

$$p_1 = \frac{F}{A_1} = \frac{200 \text{ N}}{0,0025 \text{ m}^2} = 80 \text{ 000 Pa} = 80 \text{ kPa}$$

Per il blocco K2 otteniamo:

$$p_2 = \frac{F}{A_2} = \frac{200 \text{ N}}{0,01 \text{ m}^2} = 20 \text{ 000 Pa} = 20 \text{ kPa}$$

(Le aree A_1 e A_2 devono essere date in m^2 affinché il risultato sia in pascal.)

Attraverso il corpo K in fig. 9.4 fluisce una corrente di quantità di moto di 200 N in direzione negativa. Nel calcolo della grandezza p , se ne tiene conto facendo precedere il valore dell'intensità di corrente dal segno meno. Quindi:

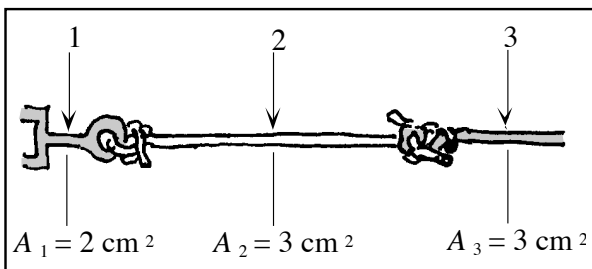


Fig. 9.5. Per l'esercizio 1

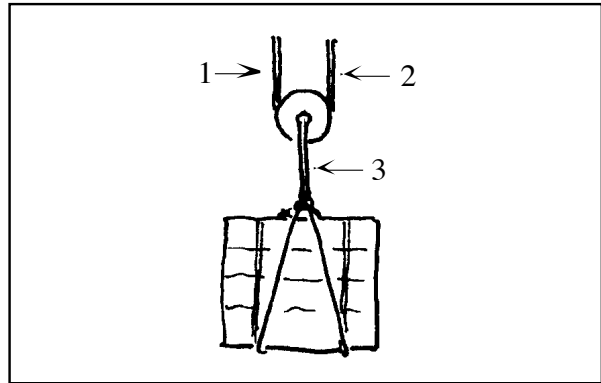


Fig. 9.6. Per l'esercizio 2

$$p = \frac{-200 \text{ N}}{0,01 \text{ m}^2} = -20 \text{ 000 Pa} = -20 \text{ kPa}$$

Una pressione negativa significa trazione.

Riassumendo:

Pressione uguale forza per unità di superficie.

Esercizi

1. Un'auto viene trainata. La fig. 9.5 mostra un dettaglio: il gancio dell'auto trainata e un pezzo di cavo metallico al quale è annodata una corda di materiale sintetico. Nell'auto fluisce una corrente di quantità di moto di 420 N. Calcola la tensione nei punti 1, 2 e 3. Attento al segno: è compressione o trazione?
2. La corda in fig. 9.6 ha una sezione di $1,5 \text{ cm}^2$. La cassa ha una massa di 12 kg. Calcola la trazione nei punti 1, 2 e 3.
3. Schiaccia una puntina da disegno in un pannello di legno. Stima la pressione a metà altezza della parte che si conficca nella tavola. Che pressione c'è sulla punta della puntina?
4. Stima la pressione sulla punta di un chiodo quando lo colpisci con un martello.

9.2 Tensione in tre direzioni

Vogliamo sottoporre un corpo a compressione e trazione contemporaneamente. "Non è possibile" si potrebbe obiettare, "o è sottoposto a compressione o a trazione, si escludono a vicenda!" Ignoriamo l'obiezione e proviamo - e abbiamo successo.

Afferriamo un oggetto con entrambe le mani, per esempio una spugna, e stringiamo. Contemporaneamente la allunghiamo, fig. 9.7. L'interno della spugna è effettivamente sottoposto sia a compressione che a trazione: compressione in direzione orizzontale e trazione in direzione verticale. La fig. 9.8 mostra una situazione simile: il blocco K è sottoposto a trazione in direzione orizzontale e a compressione in direzione verticale. Naturalmente potrebbe essere sottoposto a trazione o compressione in entrambe le direzioni. Inoltre compressione e trazione possono assumere valori diversi nelle due direzioni.

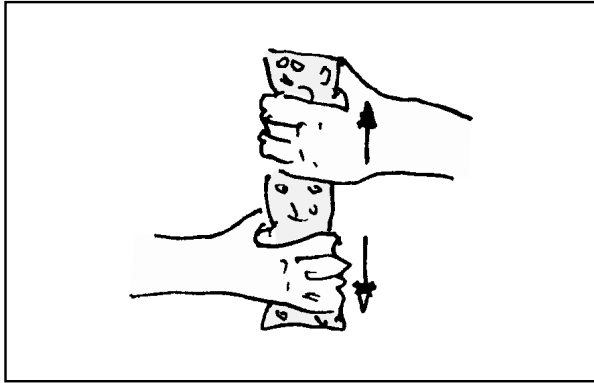


Fig. 9.7. L'interno della spugna è sottoposto a trazione in direzione verticale e a compressione in direzione orizzontale

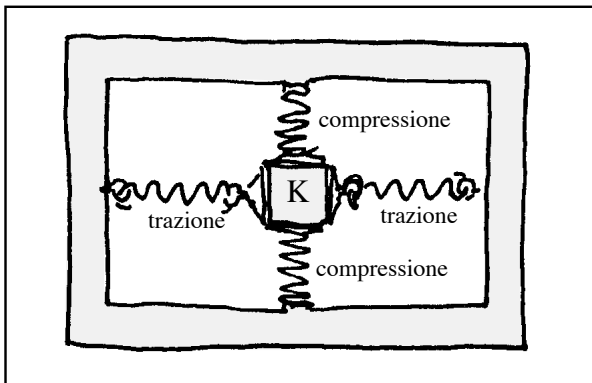


Fig. 9.8. Il blocco è sottoposto a compressione in direzione verticale e a trazione in direzione orizzontale.

Nel caso in fig. 9.9 la pressione orizzontale vale

$$p_1 = \frac{50 \text{ N}}{0,01 \text{ m}^2} = 5000 \text{ Pa} = 5 \text{ kPa}$$

e quella verticale

$$p_2 = \frac{300 \text{ N}}{0,015 \text{ m}^2} = 20\,000 \text{ Pa} = 20 \text{ kPa}$$

Infine potremmo sottoporre il blocco a una qualsiasi compressione o trazione anche nella terza dimensione, fig. 9.10. Per esempio

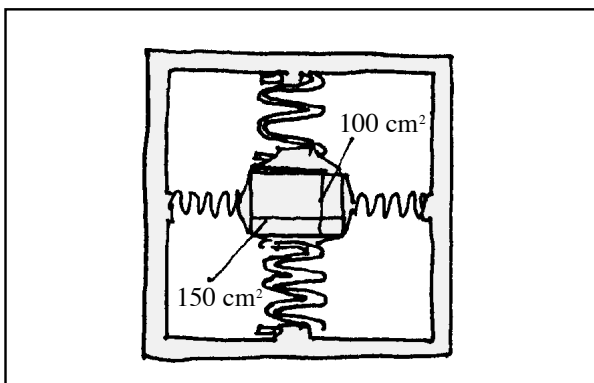


Fig. 9.9. Le pressioni in direzione orizzontale e verticale sono diverse.

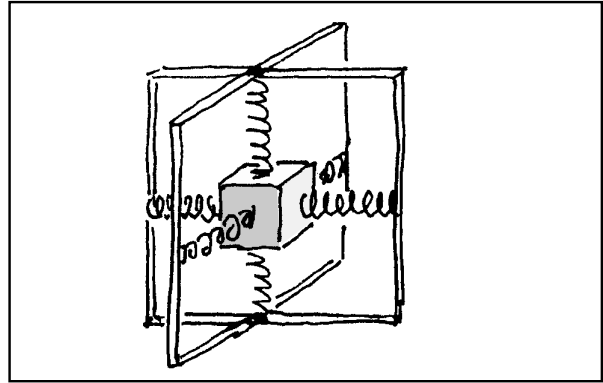


Fig. 9.10. La pressione può essere esercitata in tre direzioni perpendicolari tra loro .

$$p_1 = 5000 \text{ Pa}$$

$$p_2 = - 2000 \text{ Pa}$$

$$p_3 = - 40\,000 \text{ Pa}.$$

Potresti essere indotto a credere che si possa andare avanti creando pressione in altre direzioni. Perché non cinque diverse compressioni (o trazioni) in cinque direzioni diverse, fig. 9.11? Perché non funziona. La dimostrazione è alquanto complicata, ci limitiamo quindi al risultato:

Si può generare compressione (o trazione) in tre direzioni tra loro perpendicolari.

Quando si tenta di variare la pressione in una quarta direzione, automaticamente cambiano anche le pressioni nelle tre direzioni iniziali.

Questo risultato è valido per tutti i punti all'interno di un corpo. In ogni caso, in punti diversi la tensione meccanica può essere differente. La compressione e la trazione al centro della spugna strizzata in fig. 9.7 sono sicuramente diverse che al bordo inferiore.

Se il valore della pressione è lo stesso nelle tre direzioni perpendicolari, poniamo 12 kPa, allora anche in tutte le altre direzioni c'è la stessa pressione, cioè 12 kPa.

Ogni materiale resiste solo fino a una certa compressione o trazione. In genere i materiali sopportano meglio la compressione rispetto alla trazione.

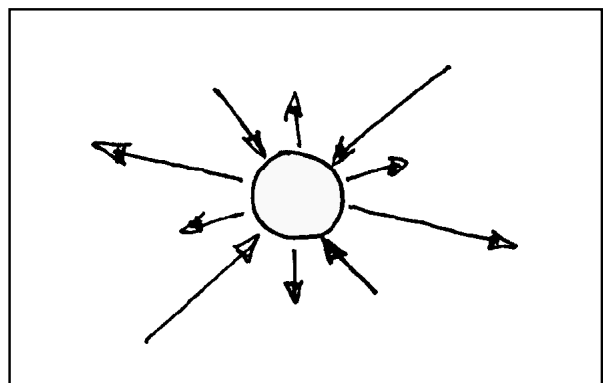


Fig. 9.11. In tre dimensioni non si possono dare più di tre pressioni (in due dimensioni non più di due).

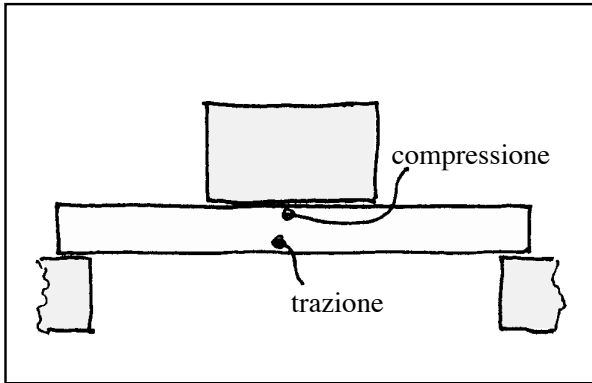


Fig. 9.12. Nella parte superiore della trave c'è compressione in direzione orizzontale, in quella inferiore c'è trazione.

Il cemento, ad esempio, sopporta compressioni di circa 50 MPa ma trazioni di circa 1/20 di questo valore. A volte però, determinati punti di una trave di cemento devono essere sottoposti a trazione. La fig. 9.12 mostra una trave di cemento sostenuta alle estremità e caricata al centro - una situazione tipica. Nella parte superiore della trave il cemento è sottoposto a compressione in direzione orizzontale. Nella parte inferiore è sottoposto a trazione, pure in direzione orizzontale. Visto che il cemento non resiste alla trazione la parte inferiore viene rinforzata con acciaio. L'acciaio resiste a trazioni più elevate.

Per lo stesso motivo, cioè aumentare la resistenza del materiale alla trazione, alcune materie plastiche sono rinforzate con fibre di carbonio. Questi materiali sono usati per esempio nella produzione di sci, trampolini per piscine e alianti.

Molti materiali hanno una resistenza alla pressione diversa nelle tre direzioni. Un esempio classico è il legno. Il legno di conifera sopporta una trazione di circa 10 MPa nella direzione della venatura e solo 1/20 perpendicolarmente.

Esercizi

1. Cita dei materiali molto resistenti alla trazione ma poco alla compressione.
2. Cita dei materiali molto resistenti alla compressione ma poco alla trazione.
3. Cita dei materiali che hanno una resistenza a compressione o trazione molto diversa in direzioni diverse.

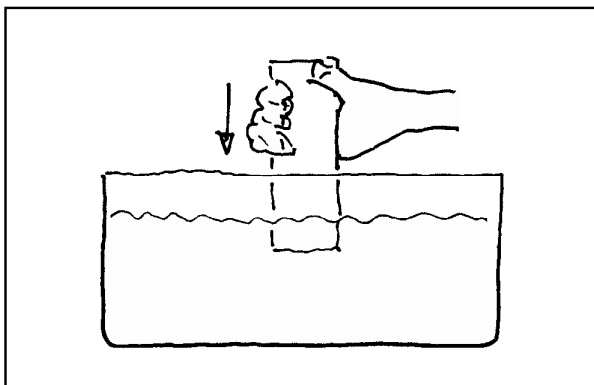


Fig. 9.13. Così non si riesce a sottoporre l'acqua a compressione. Si scansa di lato.

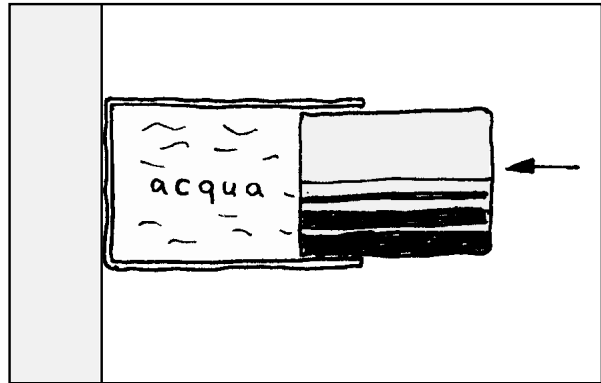


Fig. 9.14. Lo stantuffo è sottoposto a pressione solo in direzione orizzontale, l'acqua in tutte le direzioni.

9.3 La pressione nei liquidi e nei gas

Finora abbiamo trattato la tensione meccanica negli oggetti solidi. (Anche la spugna è un "solido" perché né liquida né gassosa.) Vediamo ora cosa succede a un liquido, per esempio l'acqua, sottoposto a pressione. Inizialmente procediamo di proposito in modo maldestro facendo come con il blocco in fig. 9.1: premiamo nel mezzo da sopra, fig. 9.13. Succede quello che deve succedere: l'acqua si scansa di lato.

Allora proviamo diversamente: imprigioniamo l'acqua in modo che non possa sfuggire lateralmente, fig. 9.14. Se la sezione è di $A = 5 \text{ cm}^2$ e la corrente di quantità di moto ha un'intensità di $F = 200 \text{ N}$, in direzione orizzontale c'è una pressione

$$p = \frac{F}{A} = \frac{200 \text{ N}}{0,0005 \text{ m}^2} = 2\,000\,000 \text{ Pa} = 2 \text{ MPa}$$

Ma l'acqua tenta comunque di scansarsi perpendicolarmente alla direzione in cui preme lo stantuffo e di conseguenza anche in quella direzione si sviluppa una pressione che ha lo stesso valore di quella parallela allo stantuffo. E anche in tutte le altre direzioni c'è una pressione dello stesso modulo.

L'esperimento in fig. 9.15. lo mostra chiaramente.

In un punto qualsiasi di un liquido c'è la stessa pressione in tutte le direzioni.

Lo stesso vale naturalmente anche per i gas, in quanto anche i gas si scansano di lato se non ostacolati.

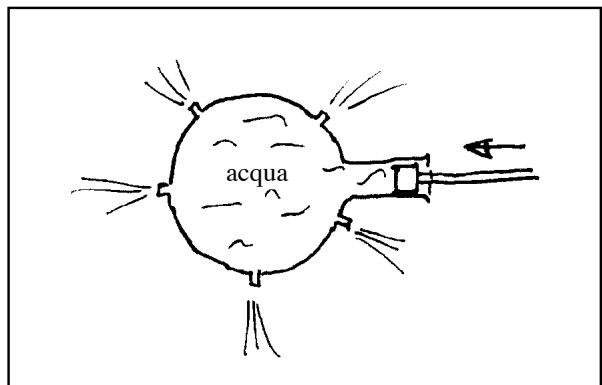


Fig. 9.15. Visto che c'è pressione in tutte le direzioni, l'acqua schizza da tutte le parti.

9.4 La densità

Consideriamo un corpo di composizione omogenea. Il corpo ha la massa m e il volume V . Il quoziente tra massa e volume è la densità ρ :

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Un corpo di ferro ha una densità maggiore di un corpo di legno in quanto un m^3 di ferro ha una massa maggiore di un m^3 di legno. Visto che la massa viene divisa per il volume, la densità è indipendente da grandezza e forma del corpo. Dipende solo dal materiale di cui è fatto il corpo. È una *proprietà della sostanza*.

Quindi non c'è bisogno di dire: "il corpo di ferro ha una densità di 7800 kg/m^3 ", perché basta dire: "il ferro ha una densità di 7800 kg/m^3 ".

Abbiamo parlato di corpi solidi per avere un'immagine più concreta, ma il quoziente m/V si può calcolare allo stesso modo anche per liquidi e gas.

Esistono molte altre proprietà delle sostanze che si possono esprimere con un valore numerico: conducibilità elettrica, conducibilità termica, colore, riscaldabilità, magnetizzabilità, potere di assorbimento...

9.5 La pressione gravitazionale

Abbiamo appena visto: la pressione in un determinato punto di un liquido è uguale in tutte le *direzioni*. Questo non significa che la pressione debba essere uguale in tutti i *punti* del liquido. Ora esamineremo una situazione dove la pressione varia da luogo a luogo.

La fig. 9.16 mostra un recipiente cilindrico riempito d'acqua. Nell'acqua c'è una pressione che aumenta dall'alto verso il basso. Vogliamo calcolare la pressione a una distanza h dalla superficie.

Consideriamo una sezione S della colonna d'acqua. L'area della sezione è A . Cominciamo cercando l'intensità della corrente di quantità di moto che attraversa la sezione.

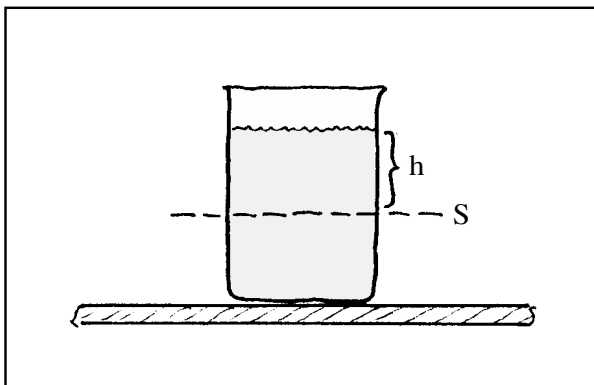


Fig. 9.16. La pressione aumenta con la profondità.

Questa corrente di quantità di moto proviene da due sorgenti.

1. Visto che la pressione atmosferica sulla superficie dell'acqua è di

$$p_{\text{atm}} = 1 \text{ bar} = 100\,000 \text{ Pa},$$

una corrente di quantità di moto di intensità

$$F_1 = p_{\text{atm}} \cdot A$$

affluisce all'acqua dall'alto e la attraversa.

2. Secondo la nostra vecchia equazione

$$F = m \cdot g, \quad (1)$$

in ogni parte di acqua affluisce una corrente di quantità di moto dal campo gravitazionale, corrente che defluisce verso il basso attraversando l'acqua (m = massa, g = costante locale). Quindi, la nostra sezione è attraversata da tutta la corrente di quantità di moto che affluisce nell'acqua che le sta sopra. Per calcolare l'intensità di questa corrente dobbiamo inserire nell'equazione (1) la massa m_{sopra} dell'acqua sovrastante la sezione:

$$F_2 = m_{\text{sopra}} \cdot g \quad (2)$$

La massa m_{sopra} si può calcolare facilmente. Risolviamo la formula

$$\rho = \frac{m}{V}$$

rispetto a m e sostituiamo ρ con la densità dell'acqua e V con il volume dell'acqua al di sopra della sezione:

$$m_{\text{sopra}} = \rho_{\text{acqua}} \cdot V_{\text{sopra}}$$

dove

$$V_{\text{sopra}} = A \cdot h.$$

Sostituiamo

$$m_{\text{sopra}} = \rho_{\text{acqua}} \cdot A \cdot h$$

nell'equazione (2) e otteniamo:

$$F_2 = m_{\text{sopra}} \cdot g = \rho_{\text{acqua}} \cdot A \cdot h \cdot g.$$

L'intensità totale F della corrente di quantità di moto è costituita da F_1 e F_2 .

$$F = F_1 + F_2$$

$$= p_{\text{atm}} \cdot A + \rho_{\text{acqua}} \cdot A \cdot h \cdot g$$

$$= (p_{\text{atm}} + \rho_{\text{acqua}} \cdot h \cdot g) \cdot A$$

Con $p = F/A$ possiamo calcolare la pressione all'altezza della sezione:

$$p = \frac{F}{A} = \frac{(p_{\text{atm}} + \rho_{\text{acqua}} \cdot g \cdot h)A}{A} \\ = p_{\text{atm}} + \rho_{\text{acqua}} \cdot g \cdot h$$

Quindi la pressione a una profondità h dalla superficie è:

$$p = p_{\text{atm}} + \rho_{\text{acqua}} \cdot h \cdot g \quad (3)$$

Così come la corrente di quantità di moto, anche la pressione ha due componenti:

- la pressione p_{atm} dell'aria che sovrasta l'acqua;
- la pressione $p_G = \rho_{\text{acqua}} \cdot h \cdot g$ causata dal peso dell'acqua. L'acqua sul fondo sente il peso dell'acqua che sta sopra. Questa componente p_G è detta *pressione gravitazionale* dell'acqua.

In effetti si tratta di una pressione in direzione verticale ma, visto che si ha a che fare con un liquido, ci deve essere la stessa pressione anche in direzione orizzontale.

Naturalmente i ragionamenti valgono anche per liquidi diversi dall'acqua. Si deve solo sostituire la densità ρ_{acqua} con la densità del liquido in questione. In generale quindi:

La pressione gravitazionale di un liquido è:

$$p_G = \rho \cdot g \cdot h$$

Calcoliamo concretamente la pressione gravitazionale nell'acqua. Sostituiamo

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3 \text{ e } g = 10 \text{ N/kg}$$

e otteniamo

$$\begin{aligned} p_G &= 1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 10 \text{ N/kg} \cdot h \\ &= 10\,000 \cdot h \cdot \text{N/m}^3 \end{aligned}$$

A una profondità dalla superficie

$$h = 10 \text{ m}$$

si ha

$$p_G = 100\,000 \text{ N/m}^2 = 100\,000 \text{ Pa} = 1 \text{ bar},$$

e per la pressione totale:

$$p = p_{\text{atm}} + p_G = 1 \text{ bar} + 1 \text{ bar} = 2 \text{ bar}.$$

Quindi, a una profondità di 10 m la pressione è superiore di 1 bar a quella sulla superficie dell'acqua, a 20 m di profondità di 2 bar, ecc.

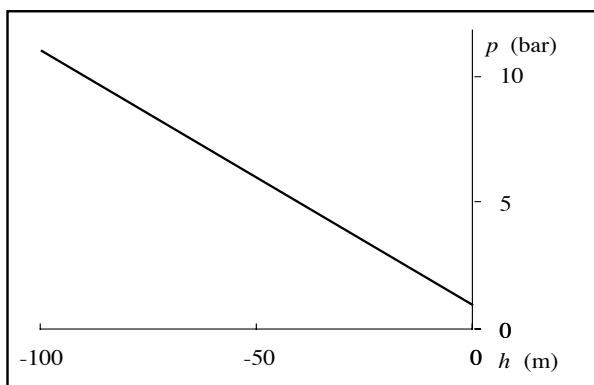


Fig. 9.17. Pressione in funzione dell'altezza dell'acqua. L'altezza zero è la superficie dell'acqua.

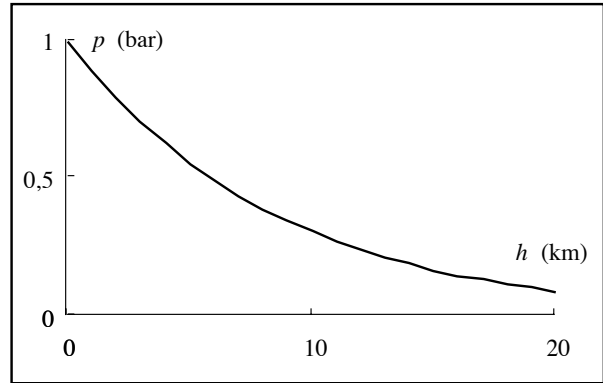


Fig. 9.18. Pressione atmosferica in funzione dell'altezza. L'altezza è positiva verso l'alto.

La fig. 9.17 mostra la pressione in funzione dell'altezza h . Lo zero di h è posto sulla superficie dell'acqua.

Così come nell'acqua la pressione diminuisce salendo, anche la pressione dell'aria sopra la superficie terrestre diminuisce salendo. La pressione dell'aria che ci circonda è la pressione gravitazionale dell'aria. In questo caso però la diminuzione di pressione verso l'alto non è lineare. Per calcolare la pressione atmosferica non possiamo più usare la formula

$$p_G = \rho \cdot g \cdot h$$

perché la densità dell'aria diminuisce con l'altezza. La fig. 9.18 mostra la pressione (gravitazionale) dell'aria in funzione dell'altezza. Nota che le altezze nelle figg. 9.17 e 9.18 hanno unità di misura diverse.

La fig. 9.19. mostra la pressione in funzione dell'altezza sopra e sotto il livello del mare. L'asse delle altezze comincia a 100 m di profondità, dove la pressione è di 11 bar. Risalendo in superficie la pressione scende fino a 1 bar. Questa è la pressione gravitazionale dell'aria a livello del mare. Salendo più in alto la pressione cala ulteriormente, ma visto che la densità dell'aria è molto piccola, anche la diminuzione è molto lenta.

Esercizi

1. Quant'è la pressione gravitazionale sul fondo di una piscina di 4 m? Quant'è la pressione totale?
2. La profondità massima del mare è circa 11 000 m. Calcola la pressione in quel punto.
3. Che pressione c'è sul fondo del recipiente in fig. 9.20? Il disco che separa i due liquidi si può spostare facilmente ed è così piccolo e leggero, che il suo influsso sulla pressione può essere trascurato. La densità del mercurio è $13\,550 \text{ kg/m}^3$.

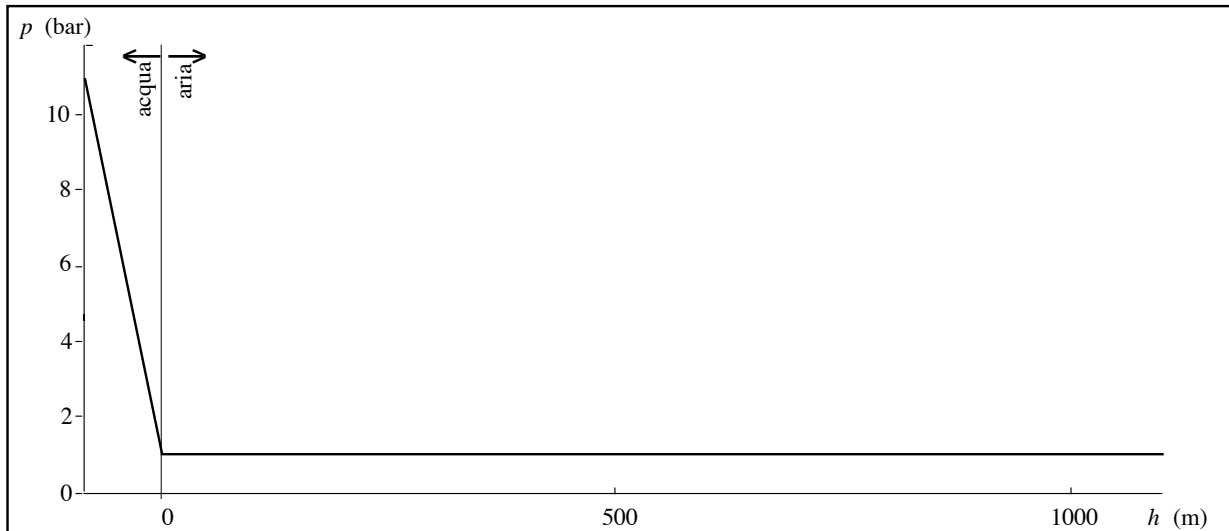


Fig. 9.19. Pressione in funzione dell'altezza sotto e sopra il livello del mare. L'altezza zero è la superficie del mare.

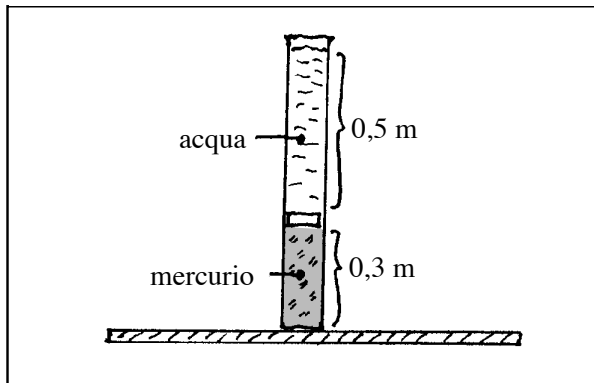


Fig. 9.20. Per l'esercizio 3

9.6 Recipienti più complessi

Per trovare la formula

$$p_G = \rho \cdot g \cdot h$$

ci siamo serviti di un recipiente con le pareti verticali. È lecito pensare che la formula valga solo per quel tipo di recipienti.

La fig. 9.21a mostra un recipiente fatto da due parti collegate con un tubo. Qual è la pressione gravitazionale nel punto A e nel punto B? Applichiamo la nostra formula e troviamo

$$\text{in A: } p_{G,A} = \rho_{\text{acqua}} \cdot g \cdot h_A$$

$$\text{in B: } p_{G,B'} = \rho_{\text{acqua}} \cdot g \cdot h_{B'}$$

Le pressioni ottenute sono esatte - si deve solo sapere cosa si è calcolato. Aggiungiamo ancora che l'aria preme sulla superficie con 1 bar.

$p_{G,A}$ è la pressione gravitazionale nel punto A causata dall'acqua contenuta nel recipiente superiore. E $p_{G,B'}$? $p_{G,B'}$ è la pressione gravitazionale che l'acqua del recipiente inferiore causa nel punto B. Dobbiamo però tener conto del fatto che l'acqua del recipiente superiore preme su quella del recipiente inferiore attraverso il tubo che li collega.

Quindi alla pressione in B non contribuisce solo l'acqua del recipiente inferiore ma, a causa del collegamento, anche quella del recipiente superiore.

Possiamo concludere: nel punto B la pressione gravitazionale di tutta l'acqua è:

$$\begin{aligned} p_{G,B} &= p_{G,A} + p_{G,B'} = \rho_{\text{acqua}} \cdot g \cdot (h_A + h_{B'}) \\ &= \rho_{\text{acqua}} \cdot g \cdot h_B \end{aligned}$$

La pressione in B è quindi la stessa che avremmo sul fondo di un unico recipiente di altezza h_B , fig. 9.21b. In altre parole: la profondità h che appare nell'equazione

$$p_G = \rho \cdot g \cdot h$$

è la distanza verticale dal piano della superficie dell'acqua - non è importante che la superficie si trovi sopra il punto considerato e non conta nemmeno la grandezza della superficie.

Quindi, in tutti i punti a una determinata profondità dalla superficie c'è la stessa pressione, come evidenzia la fig. 9.22.

Peraltro la pressione a una certa profondità è la stessa in tutti i punti solo se il liquido non scorre. Se

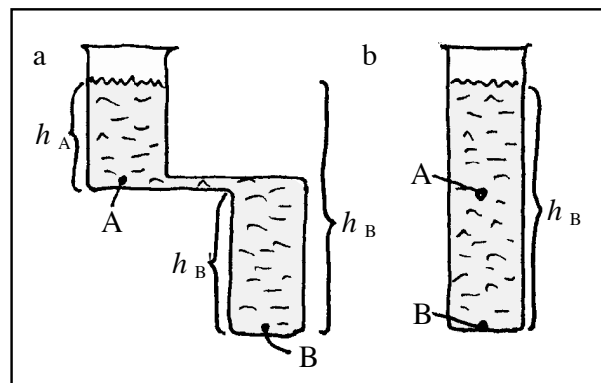


Fig. 9.21. La pressione nel punto B nel recipiente a sinistra, è la stessa che in B nel recipiente a destra.

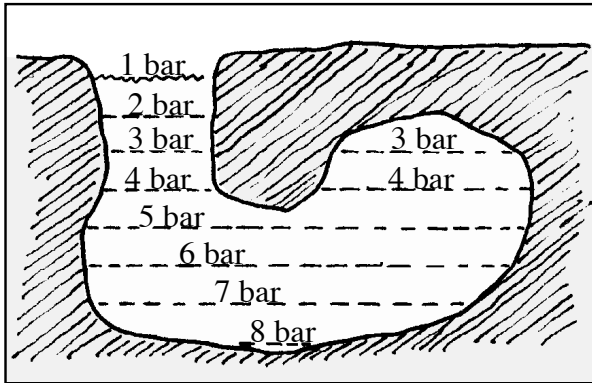


Fig. 9.22. In una massa continua di liquido, la pressione è la stessa in tutti i punti di un piano orizzontale.

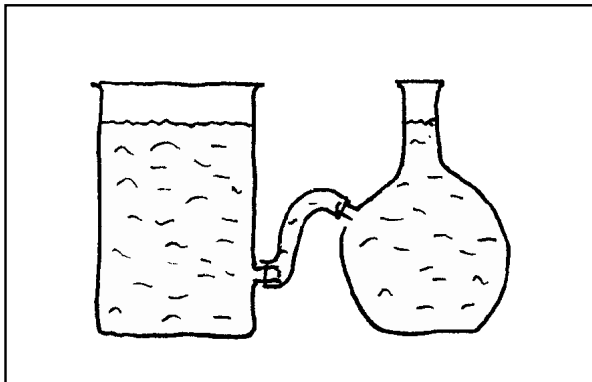


Fig. 9.23. In due recipienti collegati le superfici del liquido sono alla stessa altezza.

il liquido (o il gas) non è fermo, se c'è corrente, la pressione non è più costante in quanto è proprio una differenza di pressione a causare la corrente.

Riassumiamo:

Nei liquidi e nei gas a riposo, la pressione è uguale in tutti i punti di un piano orizzontale.

L'affermazione è in accordo con un'osservazione che ognuno di noi ha già potuto fare: in due recipienti collegati, le superfici dell'acqua sono alla stessa altezza, fig. 9.23.

Su entrambe le superfici la pressione gravitazionale è di 0 Pa, quindi è uguale. Di conseguenza, secondo la nostra regola, le due superfici giacciono nello stesso piano.

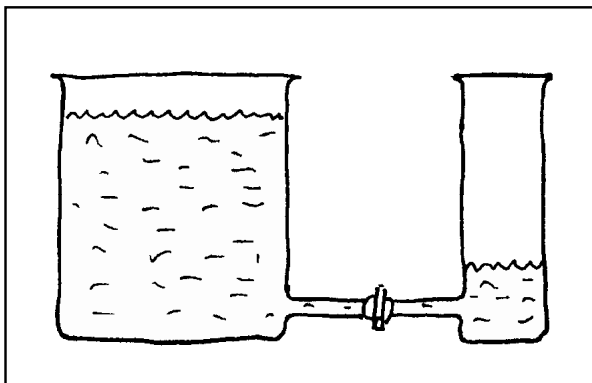


Fig. 9.24. Per l'esercizio 1

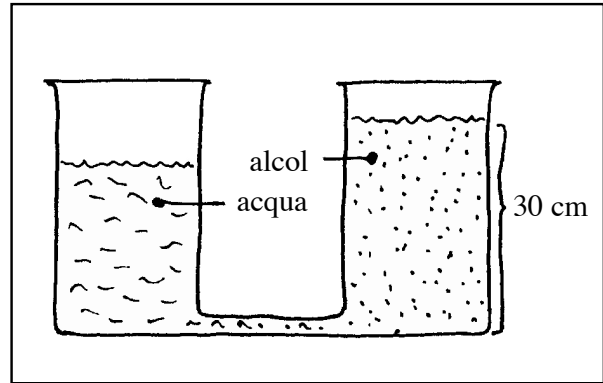


Fig. 9.25. Per l'esercizio 2

Esercizi

1. Cosa succede aprendo il rubinetto in fig. 9.24? Perché?
2. Nel recipiente a sinistra in fig. 9.25 c'è acqua, in quello a destra alcol. Il confine tra i due liquidi è nel tubo orizzontale. Il livello del liquido nel recipiente a destra è più alto che nell'altro. Perché? Qual è la differenza di altezza? ($\rho_{\text{alcol}} = 790 \text{ kg/m}^3$)

9.7 La spinta idrostatica

Una palla viene spinta sott'acqua. Ci accorgiamo che la palla "vuole" risalire. Da cosa dipende? L'acqua preme da tutte le parti sulla superficie della palla. Visto che nell'acqua la pressione aumenta con la profondità, la pressione sulla palla sarà maggiore sulla parte inferiore che su quella superiore. La conseguenza: la palla viene spinta verso l'alto, fig. 9.26.

Non sono solo gli oggetti leggeri come una palla a sentire questa spinta verso l'alto, ma tutti i corpi immersi in un liquido.

Un pezzo di ferro viene appeso a un dinamometro e poi immerso in acqua, fig. 9.27. L'allungamento del dinamometro si riduce. L'acqua spinge il pezzo di ferro verso l'alto, apparentemente il pezzo di ferro diventa più leggero.

Attraverso il campo gravitazionale terrestre, nel corpo fluisce una corrente di quantità di moto di intensità

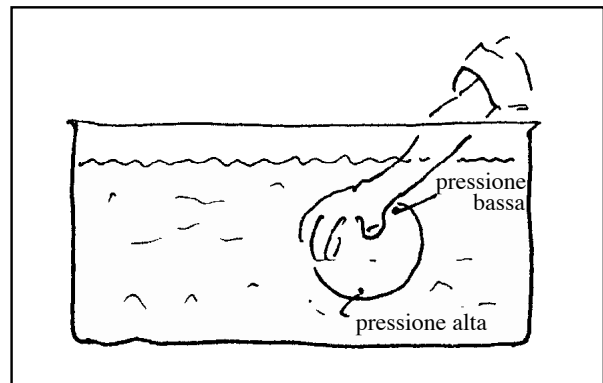


Fig. 9.26. La pressione è maggiore sulla parte inferiore della palla che sulla parte superiore.

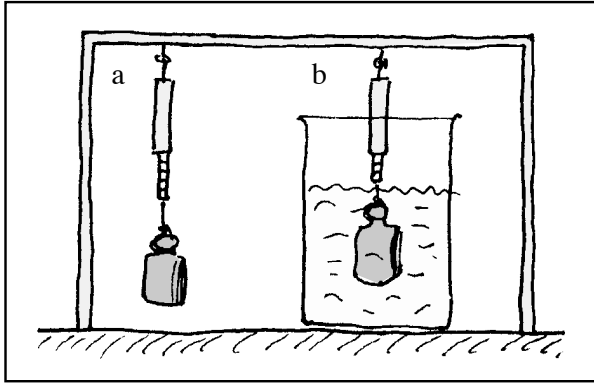


Fig. 9.27. Un pezzo di ferro appeso a un dinamometro viene immerso in acqua. Apparentemente diventa più leggero.

$$F = m_{\text{ferro}} \cdot g$$

In fig. 9.27a, questa corrente di quantità di moto defluisce nuovamente attraverso la corda. In fig. 9.27b solo una parte defluisce attraverso la corda, il resto defluisce attraverso l'acqua. L'intensità della corrente di quantità di moto che defluisce attraverso l'acqua viene detta *spinta idrostatica*. Vogliamo calcolarla.

Cominciamo dall'acqua senza il corpo immerso, limitandoci però a considerare quella porzione di acqua che dovrà far posto al corpo. (Puoi anche immaginare che quest'acqua sia separata dal resto da una sottilissima pellicola di plastica.) Questo "corpo d'acqua" resta naturalmente sospeso, non risale e non affonda. Ciò significa che non c'è né un guadagno netto né una perdita netta di quantità di moto.

Tutta la quantità di moto che affluisce al corpo

$$F_{\text{entra}} = m_{\text{acqua}} \cdot g$$

- gli arriva tramite il campo gravitazionale - defluisce nuovamente attraverso la sua superficie, all'acqua che lo circonda e poi a terra. Quindi, sappiamo che anche l'intensità della corrente di quantità di moto che defluisce deve essere

$$F_{\text{esce}} = m_{\text{acqua}} \cdot g$$

Sostituiamo il nostro corpo immaginario fatto d'acqua con il corpo di ferro. Nel corpo fluisce una corrente di quantità di moto

$$F_{\text{entra}} = m_{\text{ferro}} \cdot g$$

Dal corpo defluisce la stessa corrente di prima, in quanto la distribuzione della pressione sulla superficie del corpo di ferro è la stessa che c'era sulla superficie del corpo di acqua. Quindi defluisce una corrente di intensità

$$F_{\text{esce}} = m_{\text{acqua}} \cdot g$$

Questa volta la corrente netta non è nulla ma è

$$\begin{aligned} F_{\text{netta}} &= F_{\text{entra}} - F_{\text{esce}} \\ &= (m_{\text{ferro}} - m_{\text{acqua}}) \cdot g \end{aligned} \quad (1)$$

La spinta idrostatica F_A che cercavamo equivale a $m_{\text{acqua}} \cdot g$, cioè alla diminuzione, causata dall'immersione, della corrente di quantità di moto:

$$F_A = m_{\text{acqua}} \cdot g$$

Ricordiamoci il significato di m_{acqua} : è la massa del nostro corpo di acqua, cioè la massa d'acqua spostata dal corpo di ferro.

Naturalmente il ragionamento vale anche quando il corpo non è di ferro e il liquido non è l'acqua. Sostituiamo nell'equazione (1) la massa m_{ferro} con la massa del corpo m_C e la massa m_{acqua} con la massa del liquido m_{liq} e otteniamo:

$$F_{\text{netta}} = (m_C - m_{\text{liq}}) \cdot g \quad (2)$$

La spinta idrostatica è quanto viene tolto a $m_C \cdot g$, cioè:

$$F_A = m_{\text{liq}} \cdot g$$

Possiamo anche dire:

La massa apparente equivale alla massa effettiva diminuita della massa del liquido spostato.

Vogliamo riscrivere l'equazione (2) in una forma più comoda. Sostituiamo le masse m_C e m_{liq} con l'aiuto dell'equazione

$$m = \rho \cdot V$$

ottenuta da

$$\rho = m/V.$$

Quindi

$$m_C = \rho_C \cdot V \quad (3)$$

e

$$m_{\text{liq}} = \rho_{\text{liq}} \cdot V \quad (4)$$

Il volume V del corpo è lo stesso volume dell'acqua spostata.

Sostituendo le equazioni (3) e (4) nella (2) si ottiene:

$$F_{\text{netta}} = (\rho_C - \rho_{\text{liq}}) \cdot V \cdot g$$

Questa equazione ci dice che la corrente netta di quantità di moto è positiva se ρ_C è maggiore di ρ_{liq} ed è negativa se ρ_C è minore di ρ_{liq} . Una corrente netta positiva significa che il corpo si muove verso il basso. Una corrente netta negativa significa che il corpo si muove in direzione negativa, cioè verso l'alto: risale, galleggia. Quando $\rho_C = \rho_{\text{liq}}$, la corrente $F_{\text{netta}} = 0$ e il corpo rimane sospeso.

$\rho_C > \rho_{\text{liq}}$: il corpo affonda.

$\rho_C < \rho_{\text{liq}}$: il corpo galleggia.

$\rho_C = \rho_{\text{liq}}$: il corpo rimane sospeso.

Esercizi

1. Calcola la spinta idrostatica F_A su un pezzo di ferro di volume 5 cm^3 completamente immerso in mercurio. Se lo lasciamo andare affonda o galleggia? Di quanti grammi sembra essersi ridotta la massa del pezzo di ferro? (Densità del ferro: 7900 kg/m^3 , densità del mercurio: $13\,550 \text{ kg/m}^3$)
2. Un masso di granito da 150 tonnellate giace sul fondo del mare (densità del granito: 2600 kg/m^3). Quanto vale la spinta idrostatica? Di quanto sembra più piccola la sua massa rispetto a quando si trova sulla terra ferma?
3. Un sasso con una densità di 2400 kg/m^3 giace sul fondo di una piscina. Nell'acqua "pesa" $1,4 \text{ kg}$. Qual è la sua vera massa?
4. Il legno ha una densità inferiore all'acqua. Di conseguenza un pezzo di legno tenuto sott'acqua tende a riemergere. Quando una parte del pezzo di legno spunta dall'acqua, smette di salire. Perché?
5. Una nave pesa 1500 t . Qual è la massa dell'acqua spostata?
6. Una nave naviga prima su un fiume e poi in mare. La densità dell'acqua di mare è leggermente superiore a quella dell'acqua dolce. Che conseguenza ha per la nave?

9.8 Trazione nei gas e nei liquidi

Se beviamo una gazzosa con una cannuccia, abbiamo l'impressione di "tirarla", fig. 9.28. Altrimenti perché dovrebbe risalire nella cannuccia? Quando cominciamo a bere, nella cannuccia c'è ancora aria. Aspiriamo e la gazzosa risale. Quindi sembrerebbe possibile tirare anche l'aria.

Vedremo che questa conclusione è sbagliata. Non possiamo tirare né l'aria né la gazzosa, in generale:

I gas e i liquidi non possono essere sottoposti a trazione.

Ma dov'è l'errore? Come arriva in bocca la gazzosa, se non aspirando?

Nel cilindro in fig. 9.29a c'è aria a pressione normale: $p = 1 \text{ bar}$. Pure all'esterno c'è aria a pressione 1 bar . Anche se dall'interno l'aria preme sullo stantuffo, non è necessario trattenerlo: l'aria all'esterno

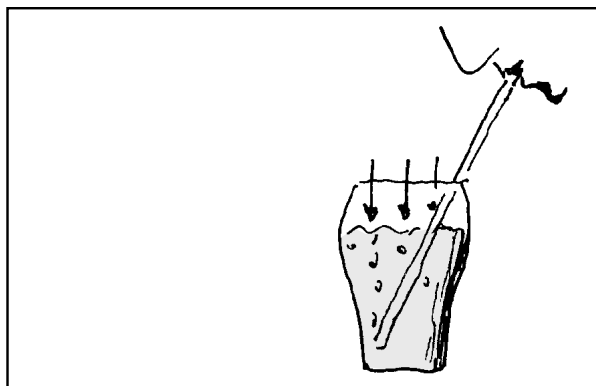


Fig. 9.28. La gazzosa viene spinta, non aspirata, verso l'alto.

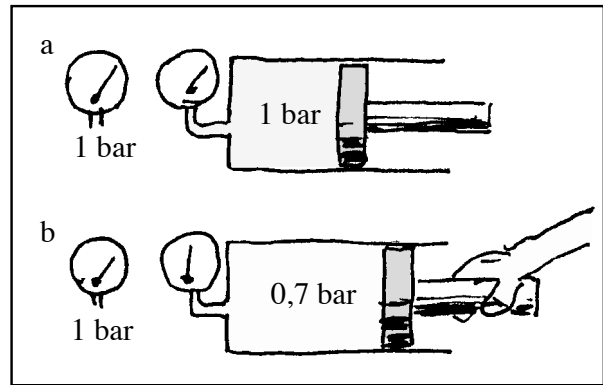


Fig. 9.29. L'aria preme sullo stantuffo sia dall'interno che dall'esterno. (a) La pressione all'interno e all'esterno è la stessa. (b) La pressione è maggiore all'esterno.

preme con la stessa intensità e le due pressioni sono in equilibrio.

Tiriamo lo stantuffo verso destra e lo teniamo fermo, fig. 9.29b. La pressione interna diminuisce, la pressione esterna ovviamente non cambia. Ora abbiamo l'impressione che qualcuno tiri lo stantuffo verso sinistra, dobbiamo trattenerlo. In effetti però è semplicemente la pressione esterna che spinge verso sinistra. All'interno la pressione è ancora positiva anche se più piccola di prima. In ogni caso non c'è trazione.

Si potrebbe pensare che si possa comunque creare un trazione all'interno tirando a sufficienza, cioè muovendo lo stantuffo molto lontano verso destra, fig. 9.30. L'esperimento dimostra che non è possibile. La pressione continua a diminuire ma sempre più lentamente. Non raggiunge mai il valore 0. Resta sempre positiva.

Invece di estrarre lo stantuffo possiamo allacciare il cilindro a una pompa a vuoto, fig. 9.31. Mentre la pompa è in funzione la pressione diminuisce e solo quando tutta l'aria è stata tolta la pressione raggiunge 0 bar . Neanche pompando più a lungo la pressione diventa negativa. Niente di strano: quando tutta l'aria è stata tolta non c'è più niente che potrebbe essere sottoposto a trazione.

Se proviamo con un liquido, per esempio l'acqua, succede qualcosa di un po' diverso, fig. 9.32. Sol-

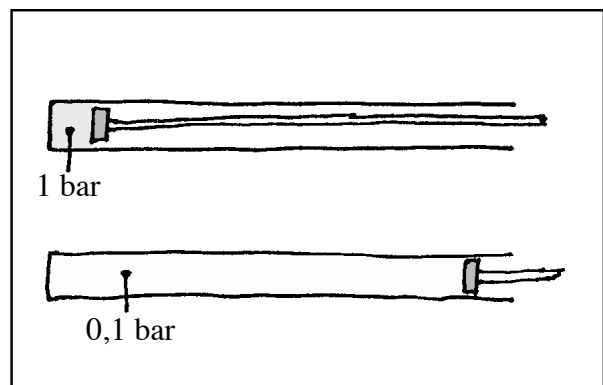


Fig. 9.30. Possiamo estrarre lo stantuffo quanto vogliamo - la pressione resta sempre positiva.

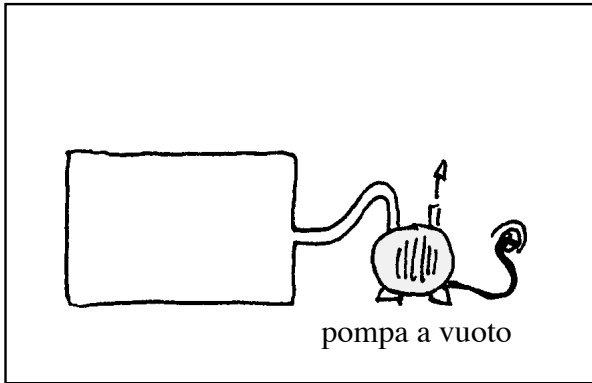


Fig. 9.31. Neanche con una pompa a vuoto si ottiene una pressione negativa.

levare lo stantuffo non è facile come con un gas. Il motivo è ancora la pressione esterna dell'aria sullo stantuffo e non una trazione all'interno. Se tiriamo abbastanza forte da superare la pressione esterna, riusciamo a muovere lo stantuffo. Osserviamo però che il liquido non si dilata come fa l'aria in fig. 9.29. Si forma invece una bolla, uno spazio dove non c'è acqua liquida. Non può essere una bolla d'aria. Da dove proverebbe l'aria? In effetti questo spazio è quasi vuoto, ma un'analisi più precisa rivela che non lo è del tutto: vi si trova una piccola quantità di vapore acqueo, cioè di acqua allo stato gassoso.

Torniamo alla nostra gazzosa. Aspirando si toglie aria dalla cannuccia. In questo modo la pressione dell'aria nella cannuccia diminuisce. Visto che l'aria all'esterno preme sulla gazzosa, questa risale nella cannuccia. Quindi la gazzosa non è tirata ma spinta verso l'alto.

Per una pompa aspirante, fig. 9.33, il discorso è molto simile. Sembra che la pompa aspiri l'acqua verso l'alto, ma in realtà diminuisce solo la pressione nel tubo per permettere alla pressione dell'aria di spingere in alto l'acqua.

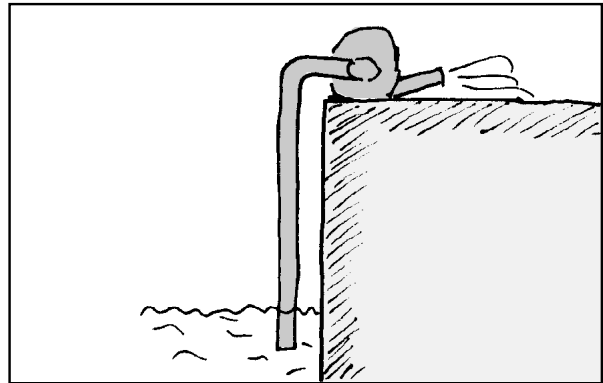


Fig. 9.33. La pompa diminuisce la pressione (positiva) alla sua entrata. L'acqua viene spinta verso l'alto attraverso il tubo, dall'aria che la sovrasta.

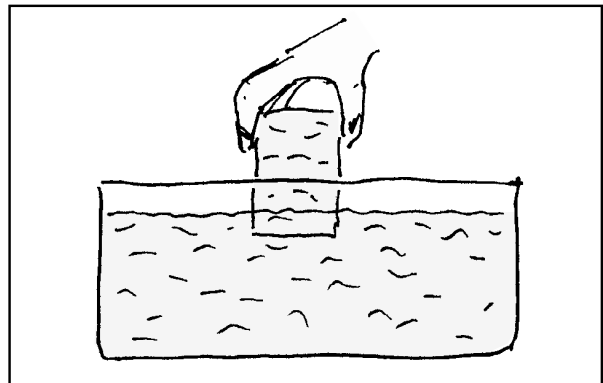


Fig. 9.34. Per l'esercizio 2

Esercizi

1. Un bicchiere rovesciato viene spinto sott'acqua. Perché non si riempie d'acqua?
2. Un bicchiere è tenuto sott'acqua finché si è riempito e poi viene sollevato con l'apertura verso il basso, fig. 9.34. Perché l'acqua resta nel bicchiere?
3. Qual è la pressione dell'acqua nel punto A in fig. 9.35? Qual è la pressione nel punto B? Cosa succede se si apre il rubinetto?

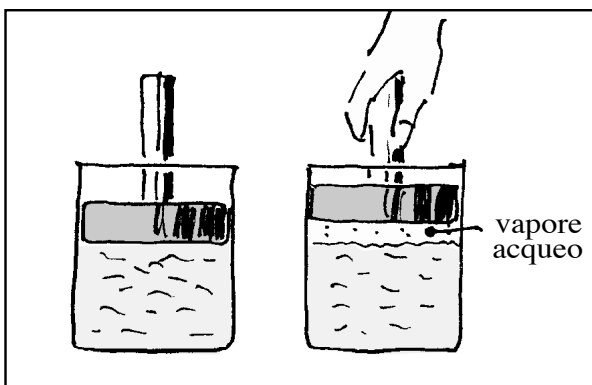


Fig. 9.32. Nel cilindro c'è acqua. Sollevando lo stantuffo si forma una bolla di vapore acqueo.

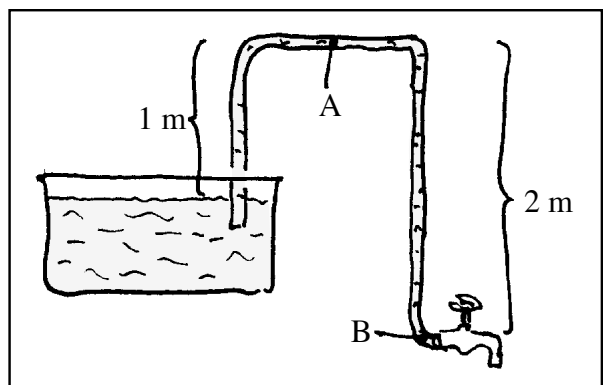


Fig. 9.35. Per l'esercizio 3

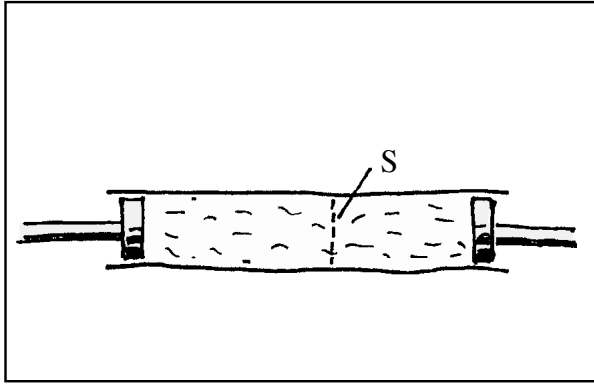


Fig. 9.36. Trasporto di energia con un liquido che scorre.

9.9 Trasporto idraulico di energia

Ora siamo in grado di capire perché le macchine idrauliche sono così pratiche.

Cominciamo esaminando la trasmissione idraulica più semplice che si possa immaginare, fig. 9.36: un tubo con due stantuffi alle estremità e un liquido tra gli stantuffi. Puoi immaginare che il liquido sia acqua. In realtà di solito si usa un olio. Il vantaggio dell'olio è di gelare a temperature molto più basse dell'acqua. Inoltre lo stantuffo viene automaticamente lubrificato.

Se spingiamo verso destra lo stantuffo a sinistra, contemporaneamente si muove anche l'altro stantuffo. Se lo stantuffo a destra si può muovere liberamente trasmettiamo pochissima energia. Quella poca energia che dobbiamo fornire a sinistra è necessaria per vincere l'attrito.

Se usiamo lo stantuffo a destra per azionare qualcosa, spingere lo stantuffo a sinistra è più difficile: forniamo energia a sinistra e questa energia esce nuovamente da destra.

Vogliamo calcolare l'intensità P della corrente di energia da sinistra verso destra, vogliamo cioè esprimerla con delle grandezze facilmente misurabili. Cerchiamo l'intensità della corrente di energia che attraversa la sezione S : quanti Joule al secondo fluiscono attraverso questa superficie?

Per quanto riguarda il trasporto di energia, il liquido nel tubo è l'equivalente di una sbarra e per una sbarra siamo in grado di dare l'intensità della corrente di energia:

$$P = v \cdot F$$

dove v è la velocità con cui si muove la sbarra e F l'intensità della corrente di quantità di moto che la attraversa.

La stessa formula deve valere anche per i fluidi idraulici. In quel caso v è la velocità con cui si muove il liquido. L'intensità della corrente di quantità di moto F può essere espressa in funzione della pressione p e dell'area A della sezione:

$$F = A \cdot p$$

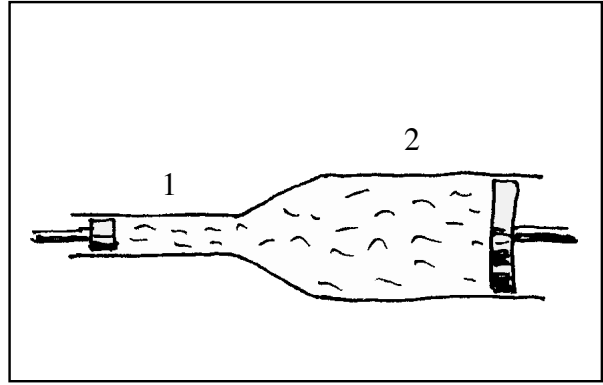


Fig. 9.37. Trasporto di energia in un tubo la cui sezione aumenta.

L'intensità della corrente di energia diventa:

$$P = v \cdot A \cdot p$$

Questa formula è molto comoda perché permette di calcolare l'intensità della corrente di energia in ogni punto di un tubo di forma e diametro qualsiasi.

Esaminiamo un tubo più complicato: un tubo la cui sezione aumenta da A_1 a A_2 , fig. 9.37, e confrontiamo le intensità delle correnti di energia nei punti 1 e 2. Nel punto 2 il liquido scorre più lentamente che in 1, quindi v_2 è minore di v_1 . Non è difficile trovare la relazione tra v_1 e v_2 .

Quando lo stantuffo a sinistra si muove di un tratto Δx_1 , viene spostato verso destra un volume di liquido di

$$\Delta V_1 = A_1 \cdot \Delta x_1$$

Lo stantuffo a destra deve fare spazio all'acqua spostata da quello a sinistra, quindi

$$\Delta V_1 = \Delta V_2$$

oppure

$$A_1 \cdot \Delta x_1 = A_2 \cdot \Delta x_2 \quad (1)$$

Se lo stantuffo a sinistra viene mosso in modo regolare e se per muoversi del tratto Δx_1 impiega il tempo Δt , la velocità v_1 dello stantuffo a sinistra è:

$$v_1 = \frac{\Delta x_1}{\Delta t} \quad (2)$$

e la velocità v_2 dello stantuffo a destra:

$$v_2 = \frac{\Delta x_2}{\Delta t} \quad (3)$$

Dividiamo per Δt entrambi i termini dell'equazione (1) e otteniamo

$$\frac{\Delta x_1}{\Delta t} A_1 = \frac{\Delta x_2}{\Delta t} A_2$$

che con le equazioni (2) e (3) diventa

$$v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2$$

Moltiplichiamo entrambi i termini per la pressione p del liquido, che è la stessa a sinistra e a destra:

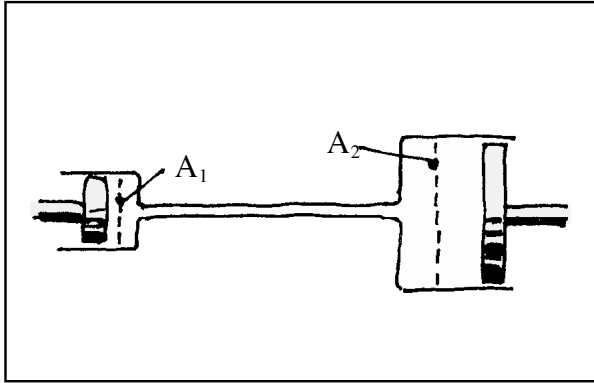


Fig. 9.38. Nello stantuffo a destra fluisce una corrente di quantità di moto più forte che in quello a sinistra.

$$p \cdot v_1 \cdot A_1 = p \cdot v_2 \cdot A_2 \quad (4)$$

Prima avevamo trovato che l'intensità della corrente di energia è:

$$P = v \cdot A \cdot p \quad (5)$$

Quindi, nell'equazione (4), a sinistra c'è l'intensità della corrente di energia in 1 e a destra l'intensità della corrente di energia in 2 e l'equazione dice che sono uguali: l'energia che immettiamo a sinistra esce di nuovo a destra - un risultato che sicuramente non ti sorprenderà.

Di conseguenza l'intensità della corrente di energia è la stessa in ogni punto del tubo. Dove la sezione è più piccola la velocità della corrente è più elevata, dove la sezione è più grande la velocità della corrente è più piccola. Ma la corrente di energia ha la stessa intensità dappertutto.

L'equazione (5) ci dice anche cosa fare se vogliamo trasmettere molta energia (al secondo): pressione elevata, tubo con una grande sezione e alta velocità. Tutte e tre le possibilità hanno comunque dei limiti. Se la pressione è troppo alta il tubo scoppia. Un tubo troppo grosso non è pratico perché poco maneggevole e una velocità di scorrimento troppo elevata ha lo svantaggio che le perdite di energia dovute all'attrito diventano consistenti.

Quindi si cerca un compromesso che renda accettabili tutti gli svantaggi.

Esaminiamo un caso tipico: la trasmissione di energia dalla pompa al braccio di una ruspa. Nei tubi

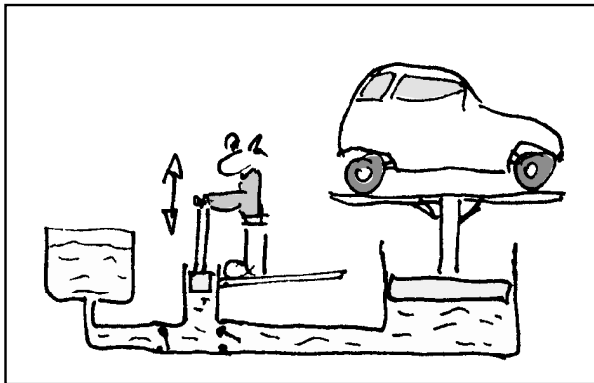


Fig. 9.39. È facile sollevare a mano l'automobile.

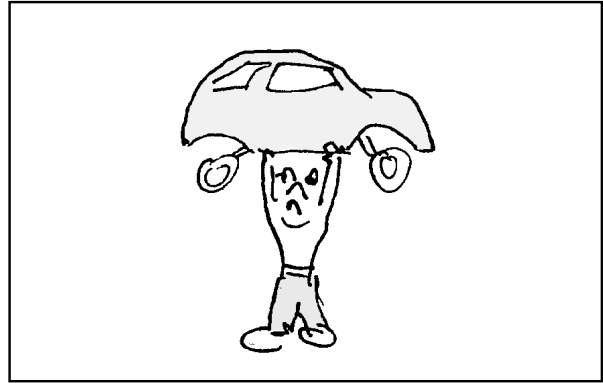


Fig. 9.40. È difficile sollevare a mano l'automobile.

della ruspa la pressione è di 150 bar = 15 MPa, la sezione dei tubi $6 \text{ cm}^2 = 0,0006 \text{ m}^2$ e la velocità di scorrimento 0,5 m/s. Per l'intensità della corrente di energia otteniamo

$$P = v \cdot A \cdot p = 0,5 \text{ m/s} \cdot 0,0006 \text{ m}^2 \cdot 15 \text{ MPa} \\ = 4500 \text{ W.}$$

Quindi, con gli impianti idraulici possiamo trasportare energia comodamente. Questi impianti hanno però altri vantaggi. Vogliamo citarne uno.

L'intensità della corrente di quantità di moto nello stantuffo 1 in fig. 9.38 è

$$F_1 = A_1 \cdot p,$$

nello stantuffo 2 è

$$F_2 = A_2 \cdot p.$$

Dalle due equazioni segue

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{A_1}{A_2}$$

Perciò, premendo sullo stantuffo a sinistra si crea in quello a destra una corrente di quantità di moto più intensa di un fattore A_2/A_1 . Possiamo sfruttare questo effetto per esempio per sollevare dei grossi pesi. Grazie all'idraulica, l'auto in fig. 9.39 può essere sollevata a mano. Ma non dimenticare: in questo modo non si risparmia energia. Il sollevamento di un'auto è sì più facile con l'idraulica che fatto direttamente, fig. 9.40, ma in compenso prende più tempo.

Esercizi

1. In un tubo dell'impianto idraulico di una ruspa c'è una pressione di 150 bar. La sezione del tubo è di 5 cm^2 , la velocità di scorrimento dell'olio 20 cm/s. Quanta energia viene trasportata? Qual è l'intensità della corrente di quantità di moto nel tubo?
2. All'entrata di una turbina idraulica c'è una pressione di 80 bar. Il diametro del tubo è 1 m. La turbina riceve 12 MJ di energia al secondo. A che velocità scorre l'acqua nel tubo?

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

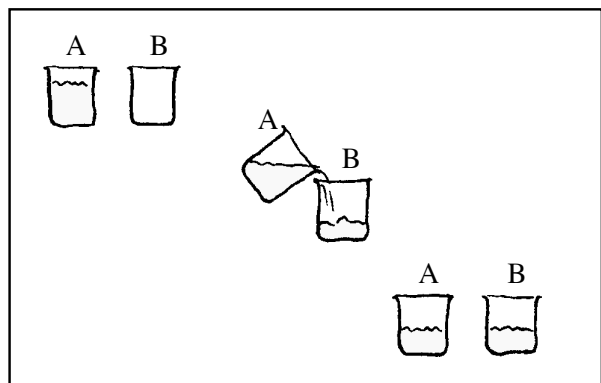


Fig. 10.1. Metà dell'acqua del bicchiere A viene versata nel bicchiere B.

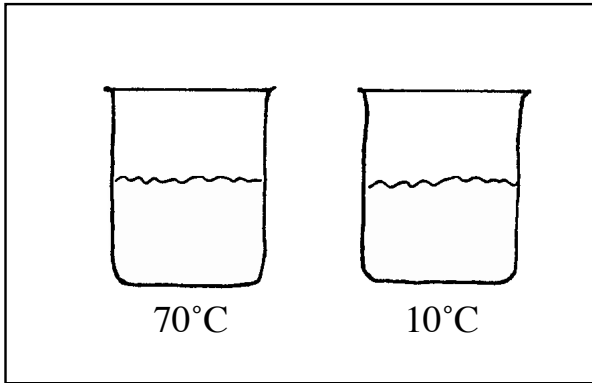


Fig. 10.2. L'acqua nel bicchiere a sinistra contiene più entropia di quella nel bicchiere a destra.

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.

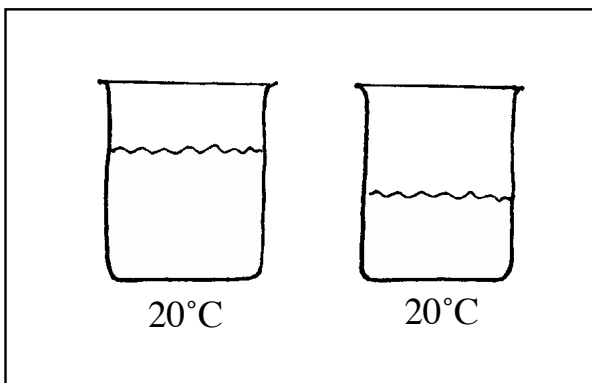


Fig. 10.3. L'acqua nel bicchiere a sinistra contiene più entropia di quella nel bicchiere a destra.

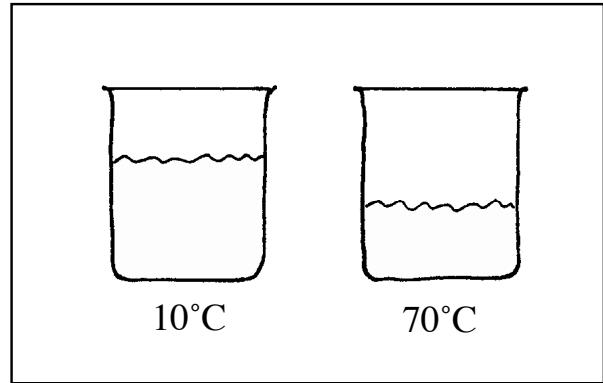


Fig. 10.4. In questo caso non è facile decidere in quale bicchiere ci sia più entropia.

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.

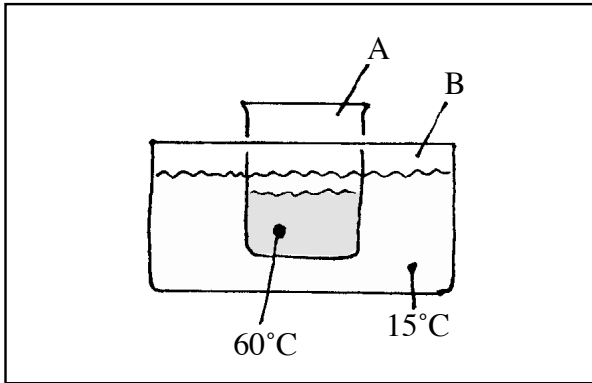


Fig. 10.5. Dal contenitore interno A al contenitore esterno B, fluisce entropia.

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.

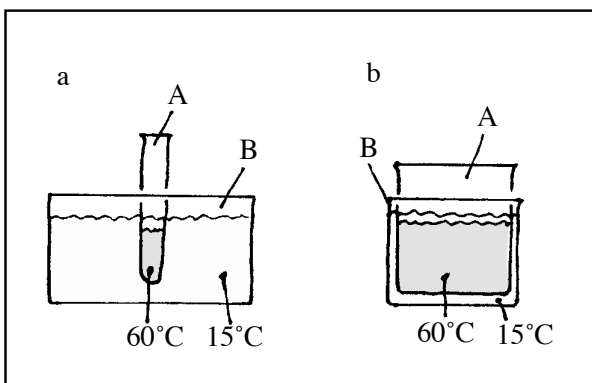


Fig. 10.6. In entrambi i casi l'entropia scorre dal contenitore interno a quello esterno.

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;

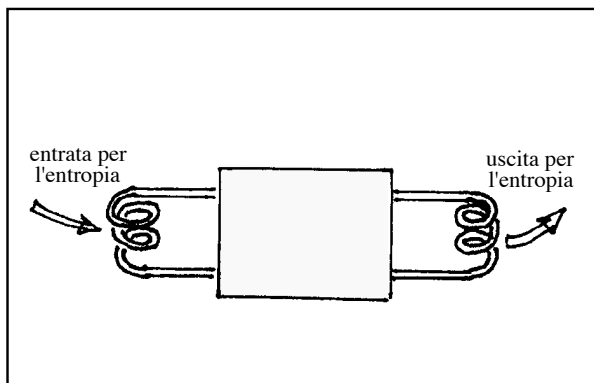


Fig. 10.7. La pompa di calore ha un'entrata e un'uscita per l'entropia.

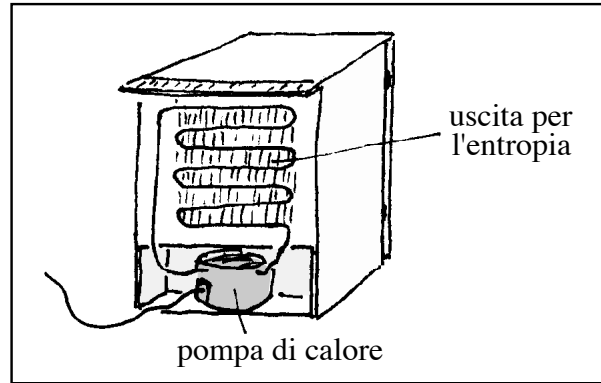


Fig. 10.8. Retro di un frigorifero. Si vedono la pompa di calore e la serpentina dalla quale l'entropia lascia dal frigorifero.

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.

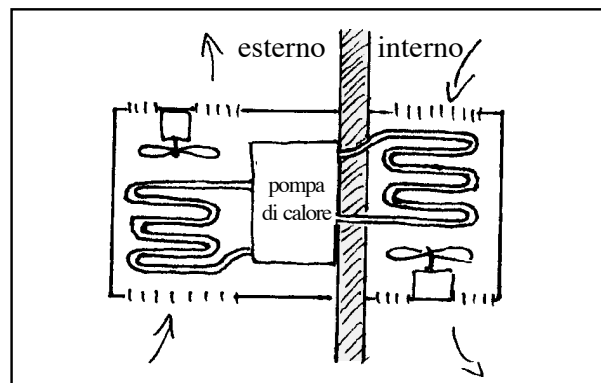


Fig. 10.9. Climatizzatore semplice. I due ventilatori servono a migliorare lo scambio di calore con l'aria.

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:

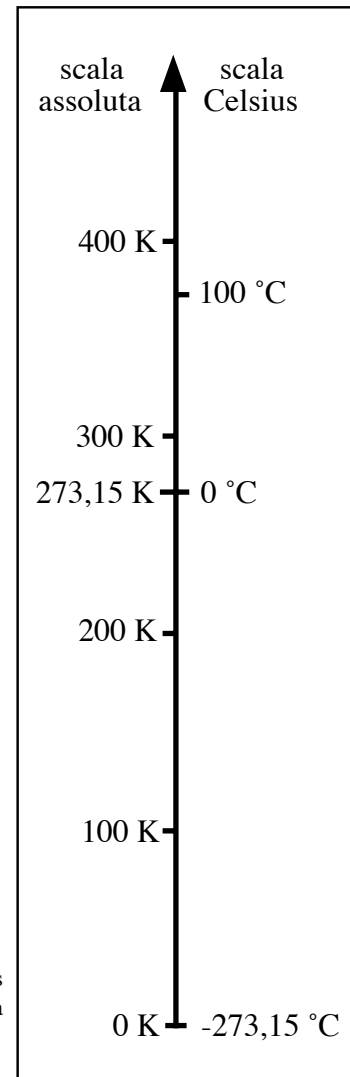


Fig. 10.10 Scala Celsius e scala della temperatura assoluta

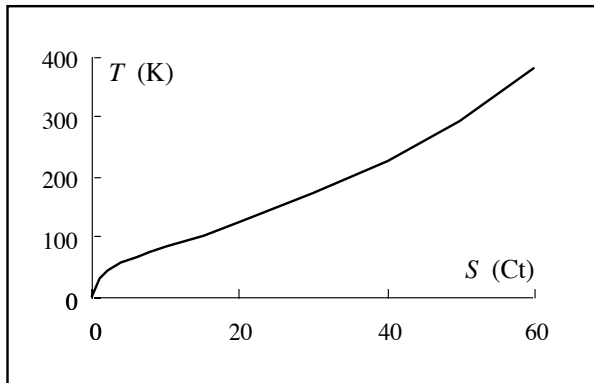


Fig. 10.11. Temperatura in funzione del contenuto di entropia, per 100 g di rame.

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

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.

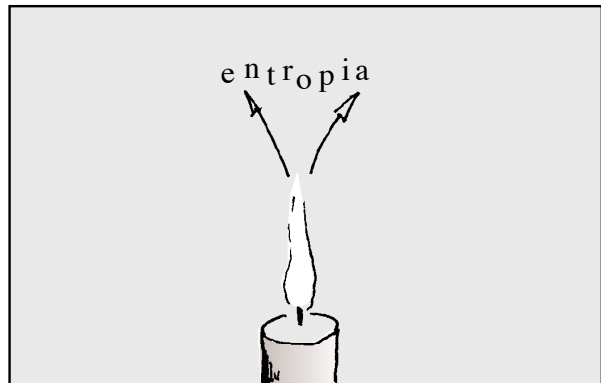


Fig. 10.12. Nella fiamma viene prodotta entropia

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.

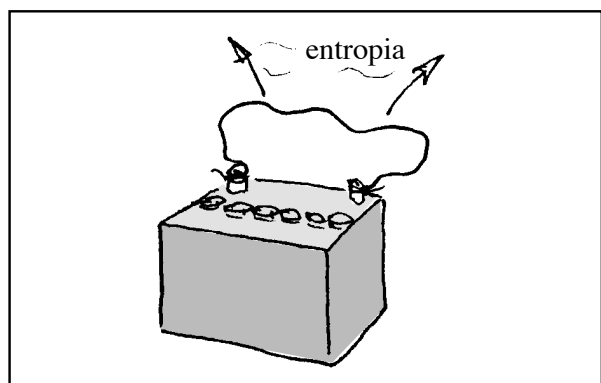


Fig. 10.13. Il filo è attraversato da una corrente elettrica. In questo modo viene prodotta entropia.

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.

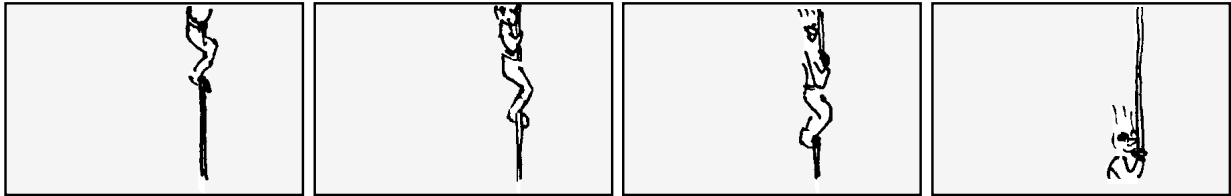


Fig. 10.15. Le immagini sono messe nella giusta sequenza?

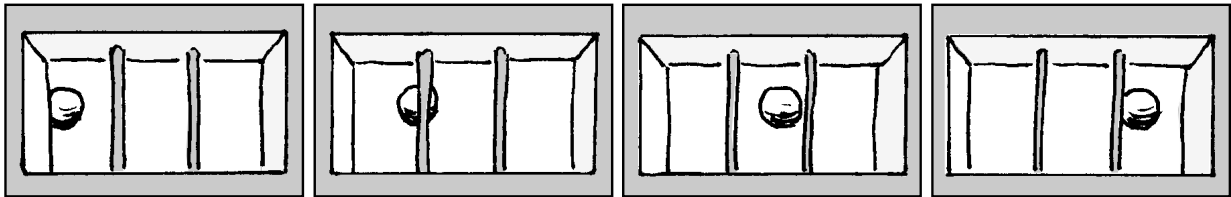


Fig. 10.16. Una palla passa davanti a una finestra. Il processo è reversibile.

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:

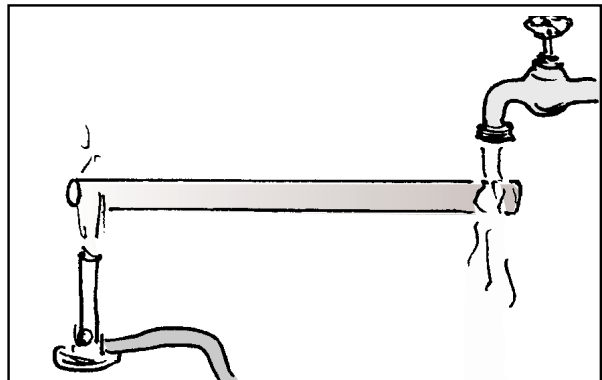


Fig. 10.17. Nelle sbarra fluisce una corrente di entropia dall'estremità calda a quella fredda.

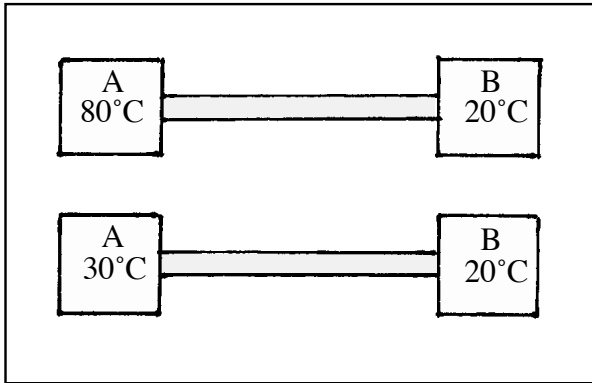


Fig. 10.18. Nel dispositivo in alto, la differenza di temperatura tra i corpi A e B è maggiore.

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

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-

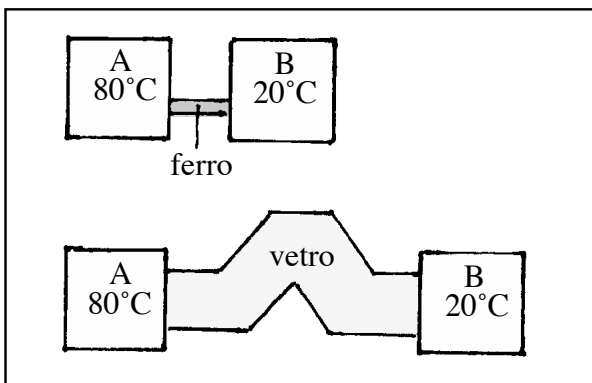


Fig. 10.19. Collegamenti con diverse resistenze termiche.

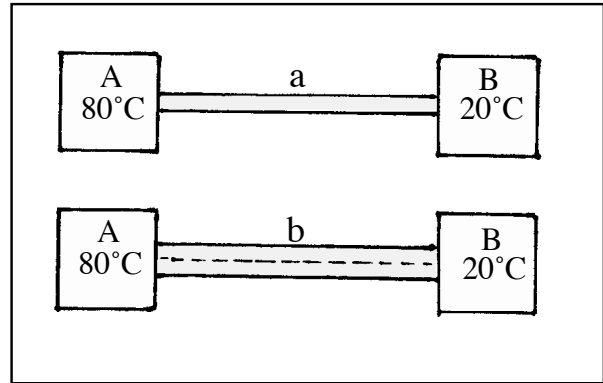


Fig. 10.20. Attraverso il conduttore più spesso, fluisce una corrente di entropia più intensa.

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.

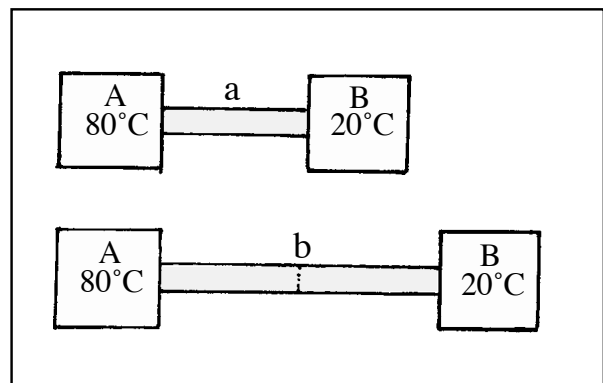


Fig. 10.21. Attraverso un conduttore più corto, fluisce una corrente di entropia più intensa.

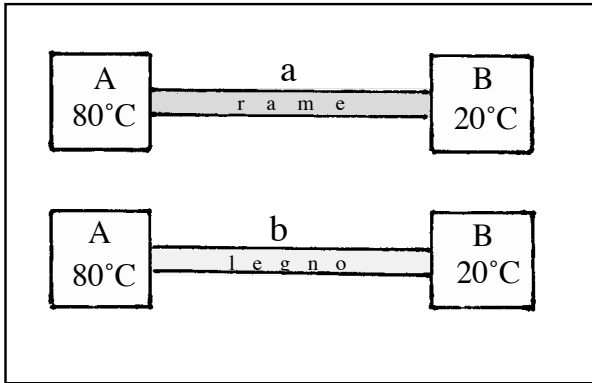


Fig. 10.22. Attraverso il conduttore di rame, fluisce una corrente di entropia più intensa che attraverso quello di legno.

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?

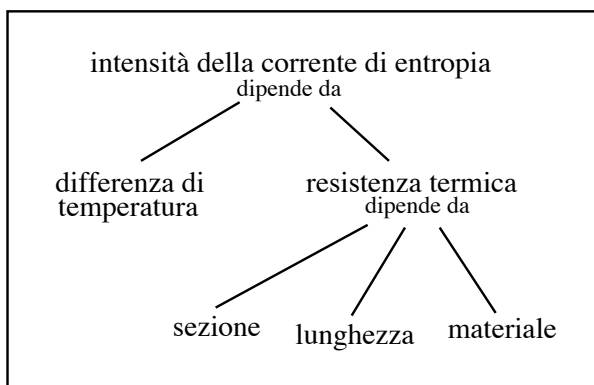


Fig. 10.23. Relazione tra intensità della corrente, differenza di temperatura e caratteristiche del conduttore.

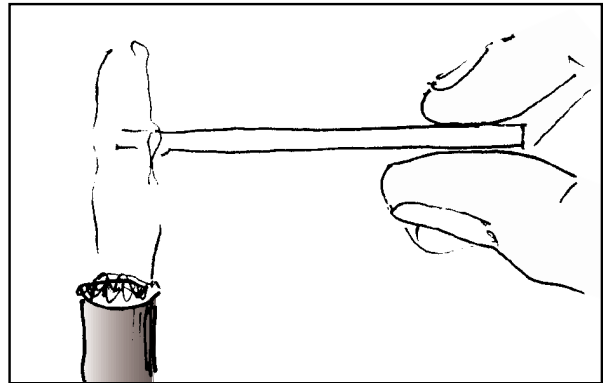


Fig. 10.24. A dipendenza della resistenza termica della sbarra, l'estremità destra si riscalda più o meno rapidamente.

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.

Toccando 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.

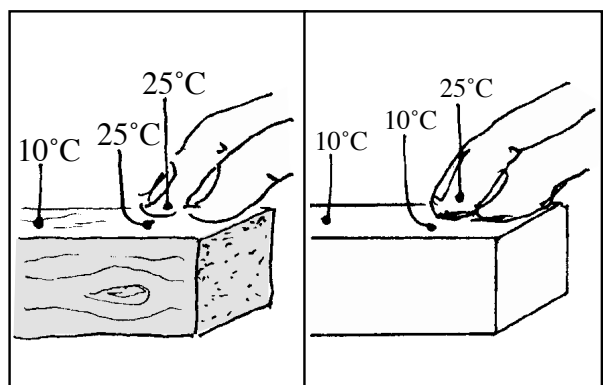


Fig. 10.25. Prima del contatto gli oggetti hanno la stessa temperatura, dopo non più.

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.

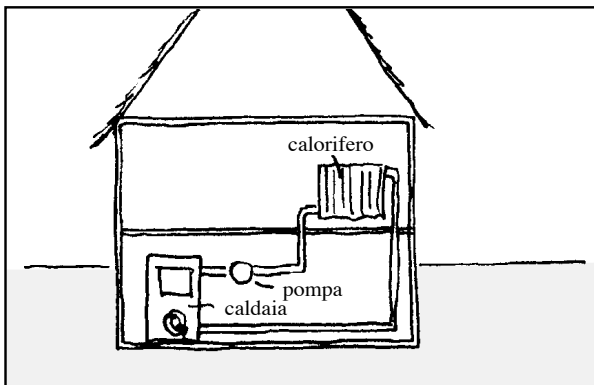


Fig. 10.26. Riscaldamento centrale. L'entropia giunge convettivamente dalla caldaia ai caloriferi.

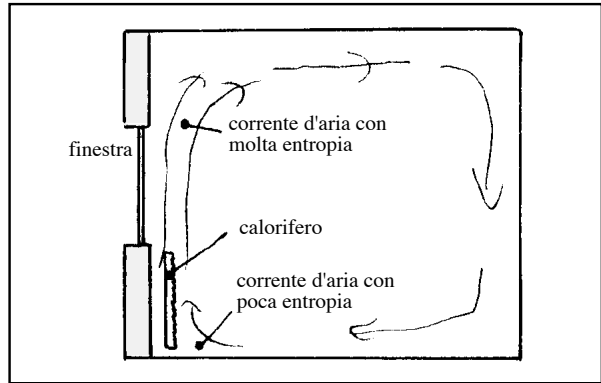


Fig. 10.27. L'entropia viene distribuita nel locale per convezione.

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.

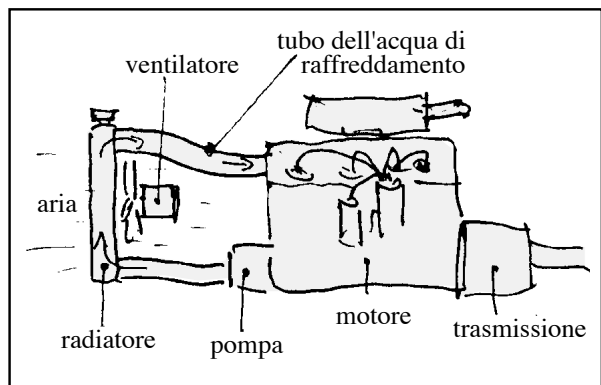


Fig. 10.28. Impianto di raffreddamento di un motore d'automobile. L'entropia va per convezione dal motore al radiatore.



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-

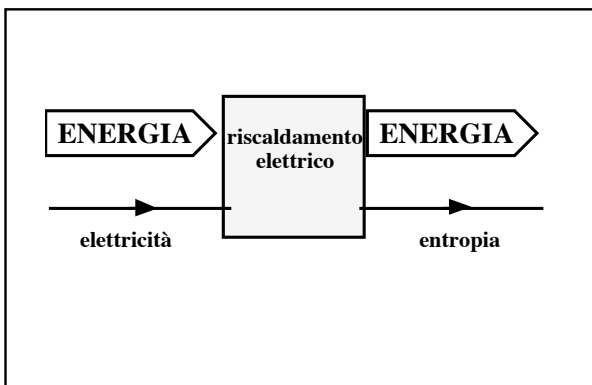


Fig. 11.1. Diagramma di flusso per un riscaldamento elettrico

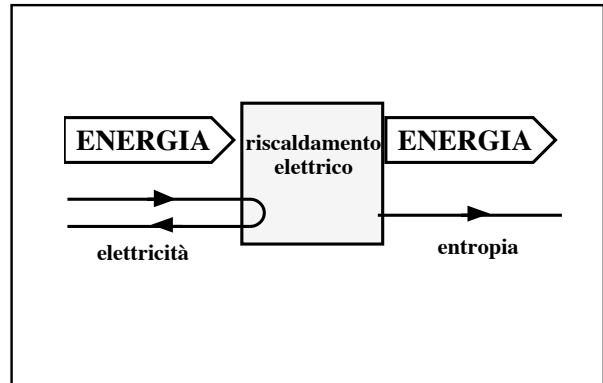


Fig. 11.2. Diagramma di flusso completo per un riscaldamento elettrico

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.

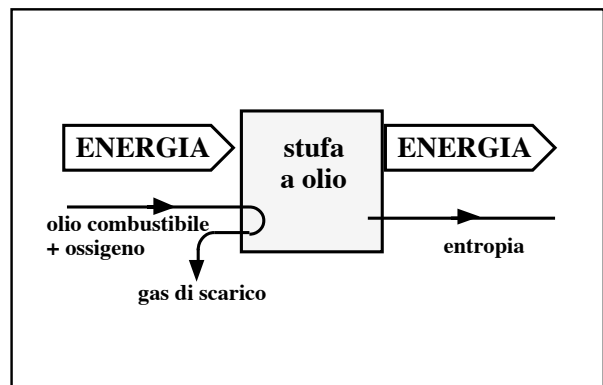


Fig. 11.3. Diagramma di flusso di una stufa a olio

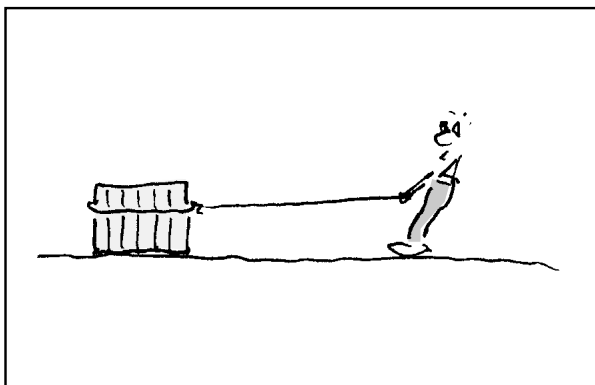


Fig. 11.4. Per l'esercizio 1. L'entropia viene prodotta alla superficie di contatto.

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.

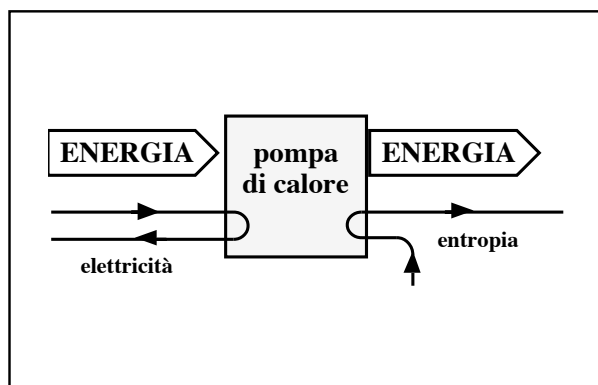


Fig. 11.5. Diagramma di flusso di una pompa di calore.

La fig. 11.5 mostra il diagramma di flusso per questo trasferitore 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 $T \cdot I_S$.

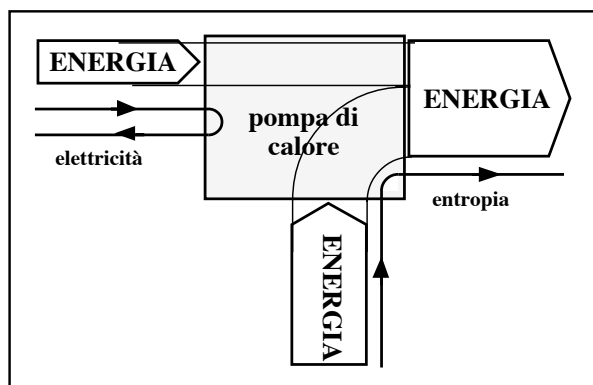


Fig. 11.6. Pompa di calore. Le correnti di energia che scorrono con l'entropia, sono raffigurate separatamente.

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*.

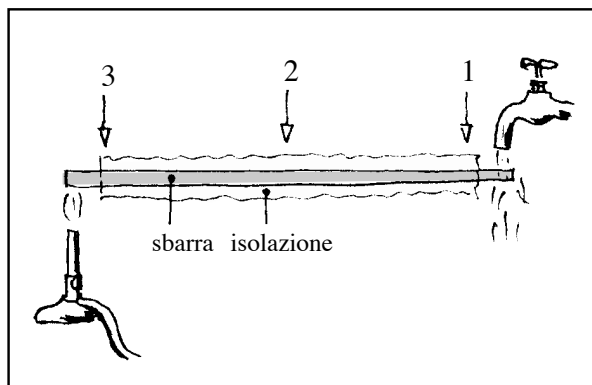


Fig. 11.7. Dall'estremità destra della sbarra esce più entropia di quanta ne sia affluita da sinistra.

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,

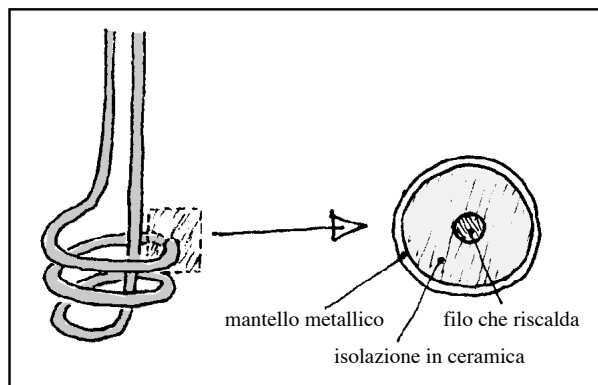


Fig. 11.8. Riscaldatore a immersione. Sulla destra, una sezione (semplificata e ingrandita).

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?

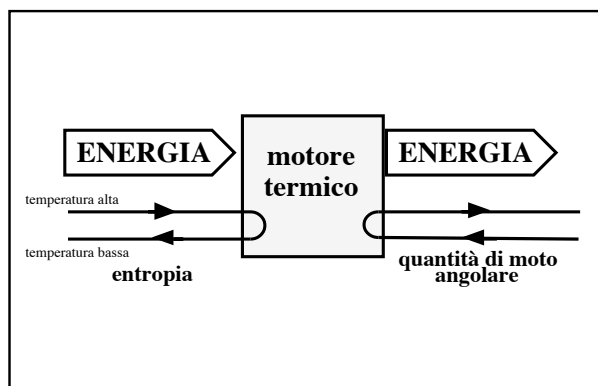


Fig. 11.9. Diagramma di flusso di un motore termico.

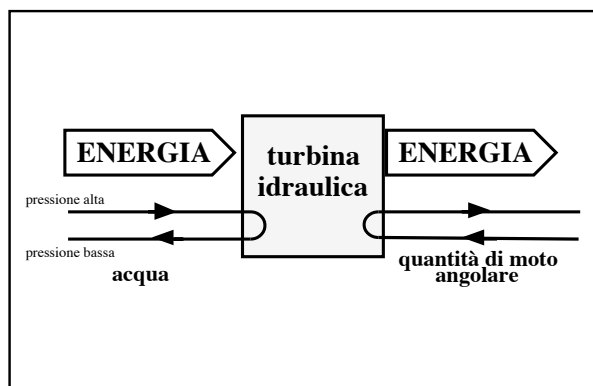


Fig. 11.10. Diagramma di flusso di una turbina idraulica.

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.

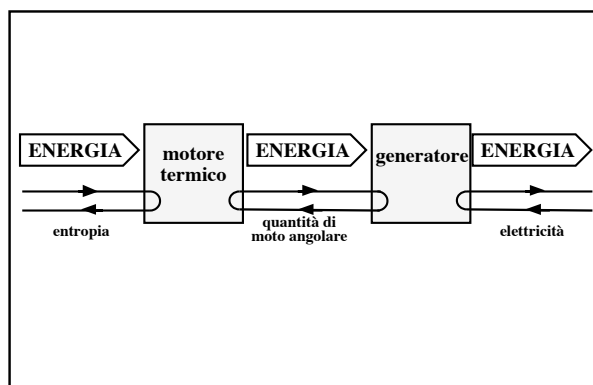


Fig. 11.11. Diagramma di flusso di una centrale termica.

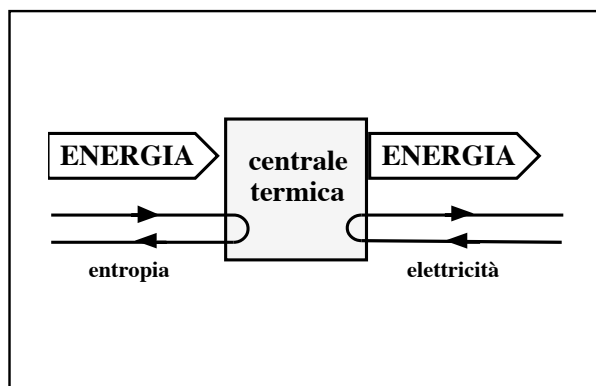


Fig. 11.12. Diagramma di flusso di una centrale termica. Turbina e generatore sono rappresentati da un solo simbolo.

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,

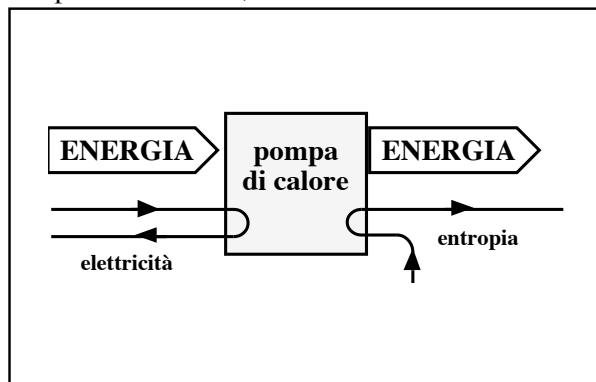


Fig. 11.13. Diagramma di flusso di una pompa di calore.

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

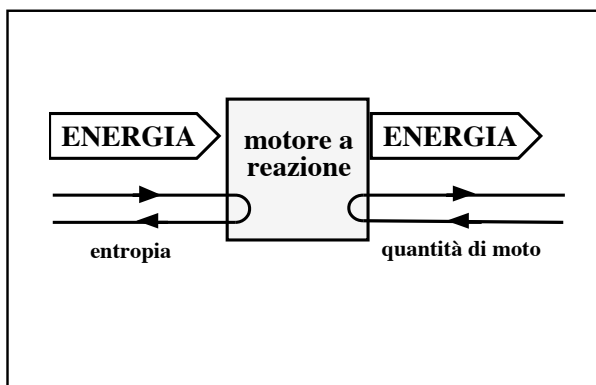


Fig. 11.14. Diagramma di flusso di un motore a reazione.

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 sé 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 corrispondenti.

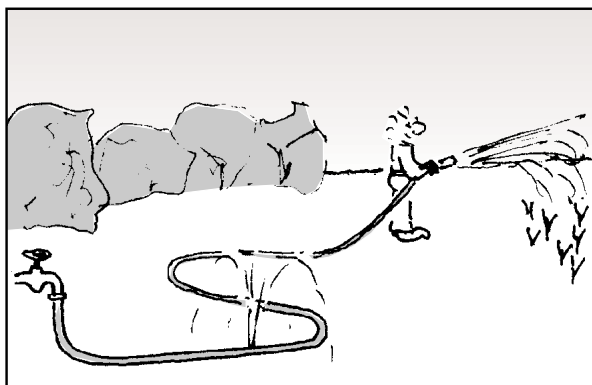


Fig. 11.15. A causa del foro nel tubo, viene persa acqua.

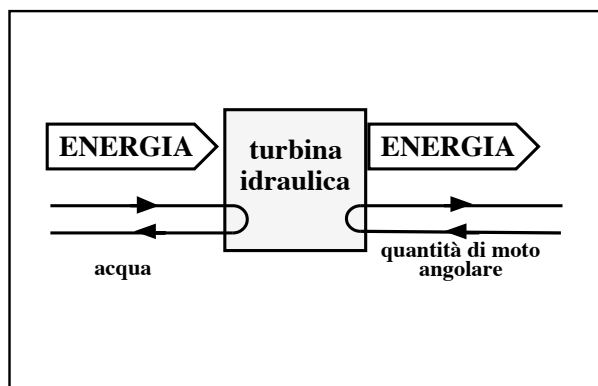


Fig. 11.16. Diagramma di flusso di una turbina idraulica ideale.

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

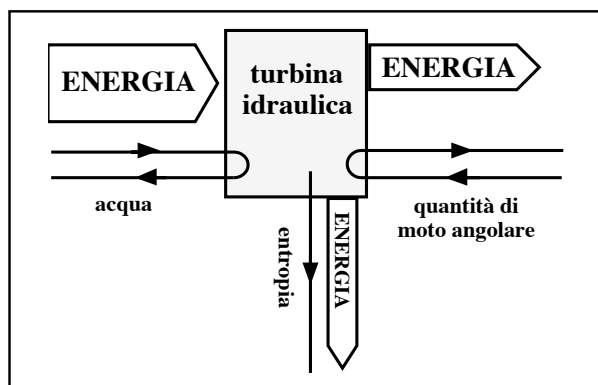


Fig. 11.17. Diagramma di flusso di una turbina idraulica reale

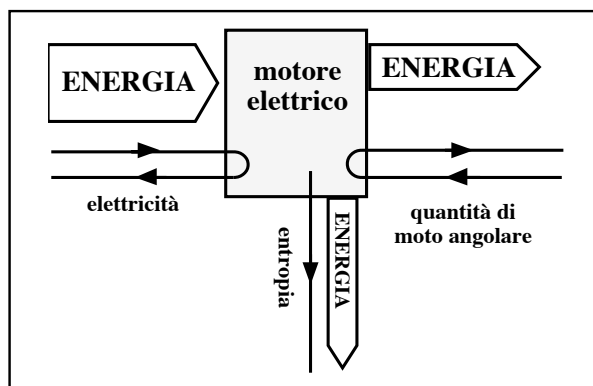


Fig. 11.18. Diagramma di flusso di un motore elettrico non idealizzato.

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%

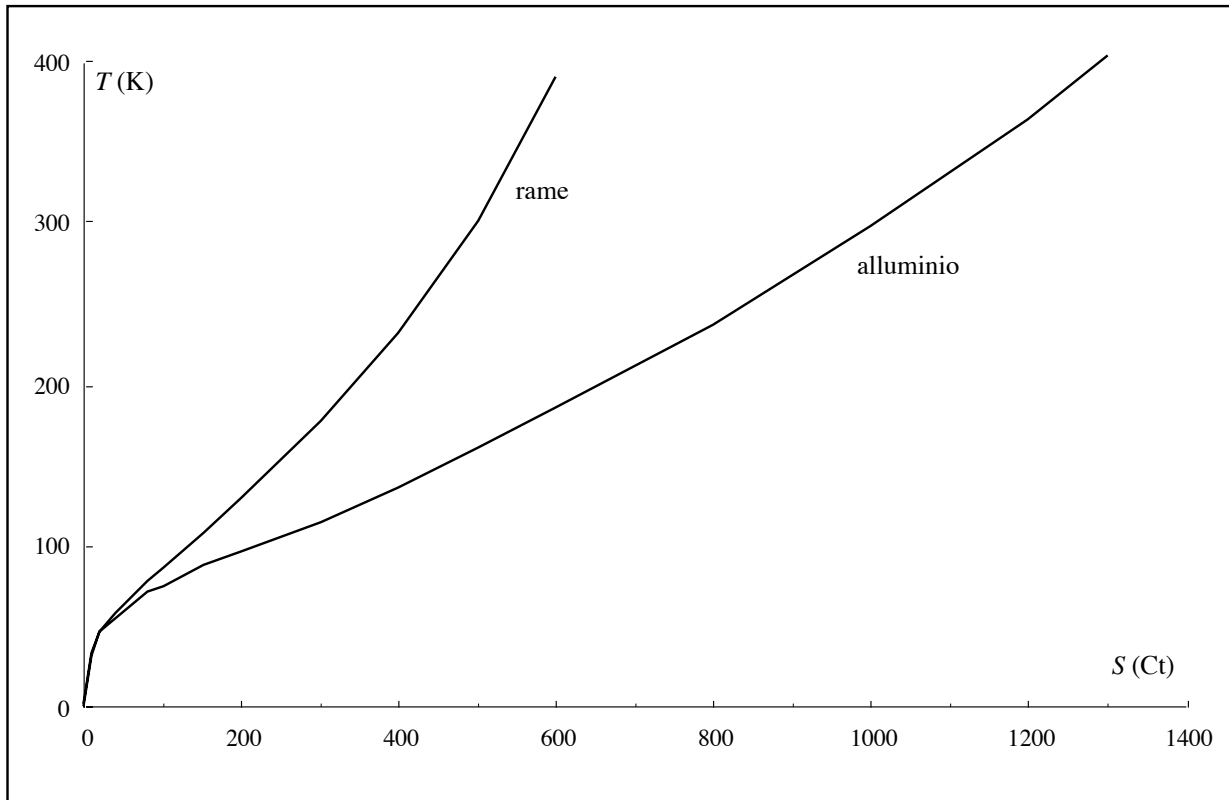


Fig. 11.19. Temperatura in funzione del contenuto di entropia, per 1 kg di rame e 1 kg di alluminio.

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).

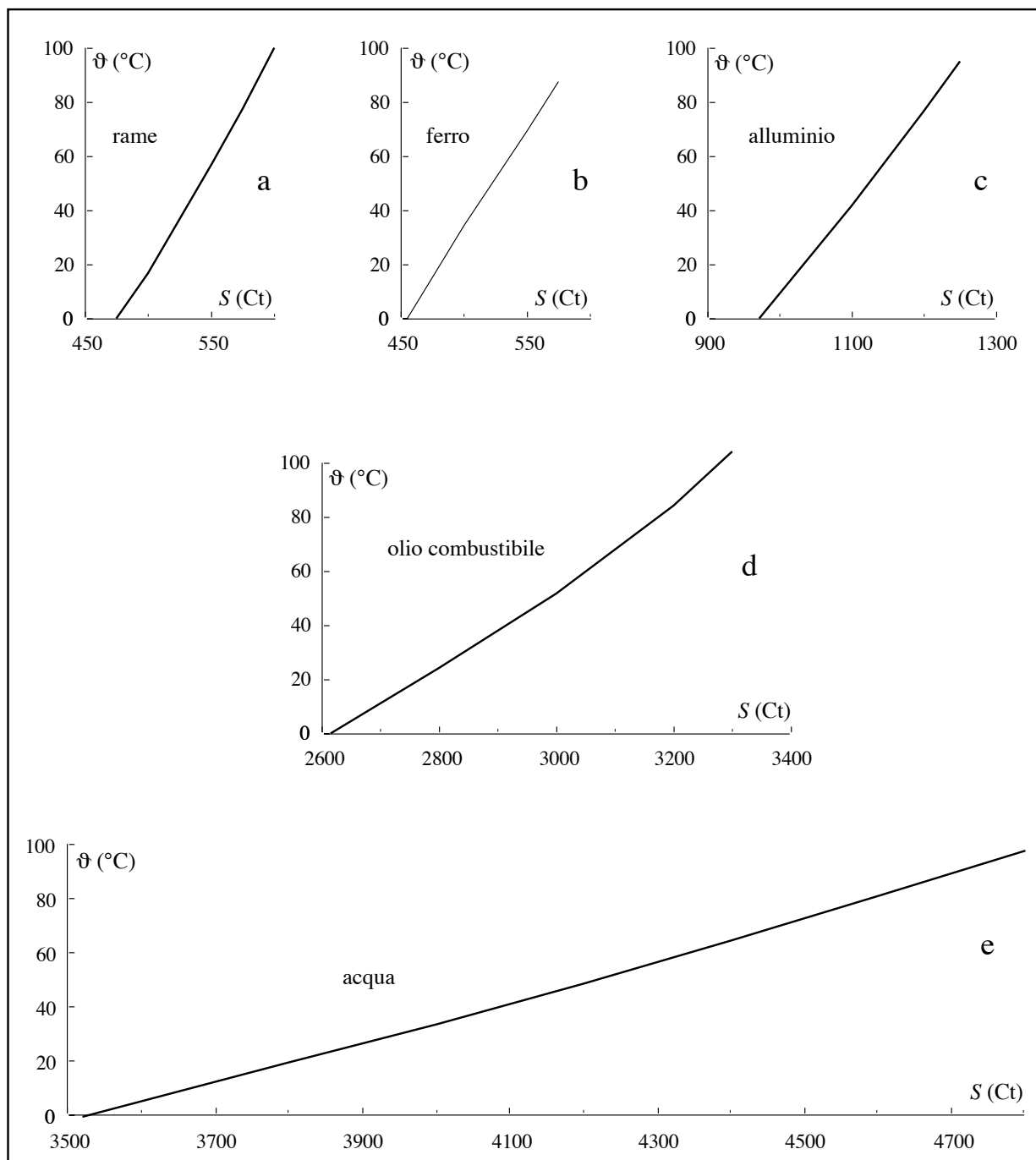


Fig. 11.20. Temperatura in funzione del contenuto di entropia per 1 kg di (a) rame, (b) ferro, (c) alluminio, (d) olio combustibile, (e) acqua. Le rispettive scale dell'entropia non cominciano con il valore $S = 0$ Ct. Le scale della temperatura non cominciano allo zero assoluto ma allo zero della scala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

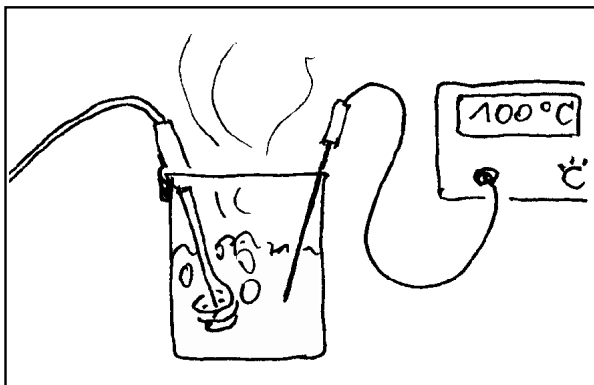


Fig. 12.1. Malgrado un ulteriore apporto di entropia, la temperatura smette di salire una volta raggiunti i 100 °C.

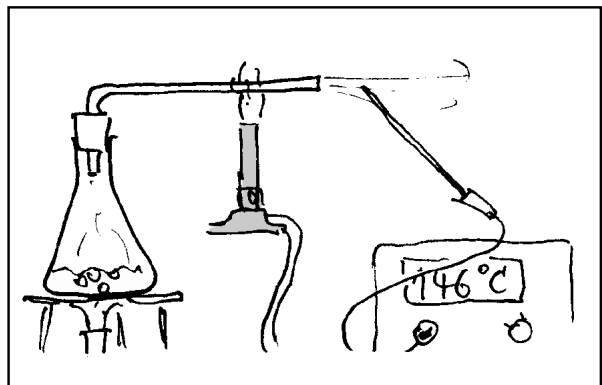


Fig. 12.2. Il vapore acqueo, inizialmente a una temperatura di 100 °C, viene ulteriormente riscaldato.

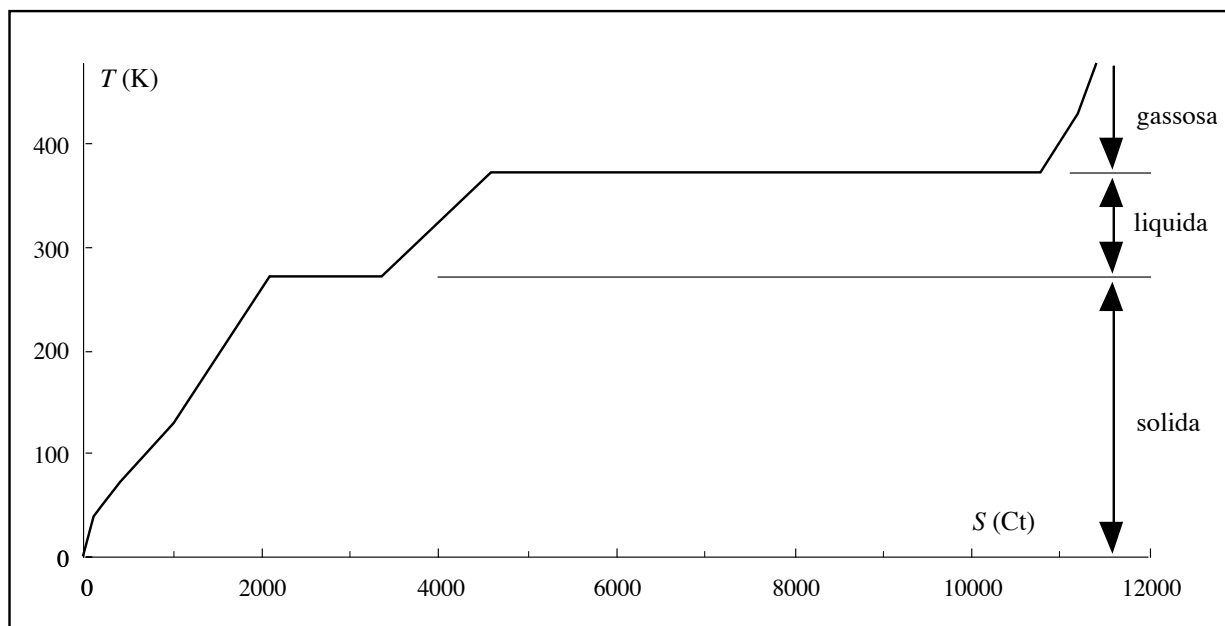


Fig. 12.3. Temperatura in funzione del contenuto di entropia per 1 kg d'acqua.

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.

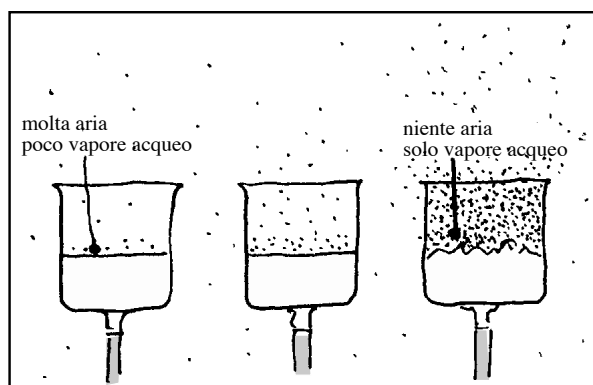


Fig. 12.4. Quando l'acqua bolle, il vapore acqueo spinge via tutta l'aria che sta sopra la superficie dell'acqua.

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.

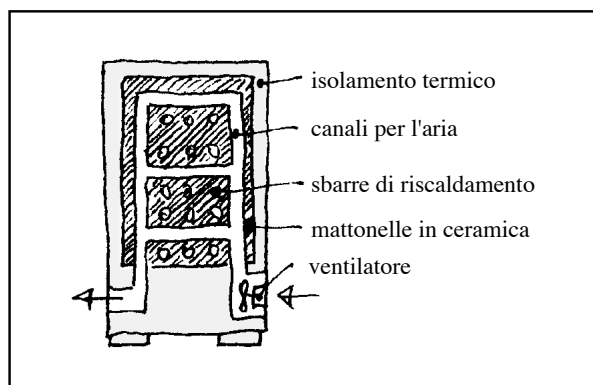


Fig. 12.5. Stufa ad accumulazione

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-

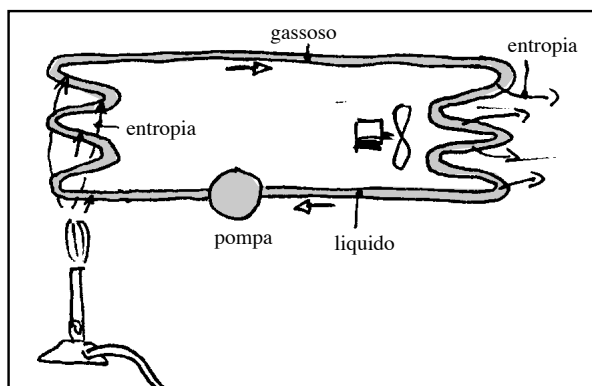


Fig. 12.6. A sinistra, una sostanza viene fatta evaporare. In questo modo si carica di molta entropia che cede nuovamente a destra, quando condensa.

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:

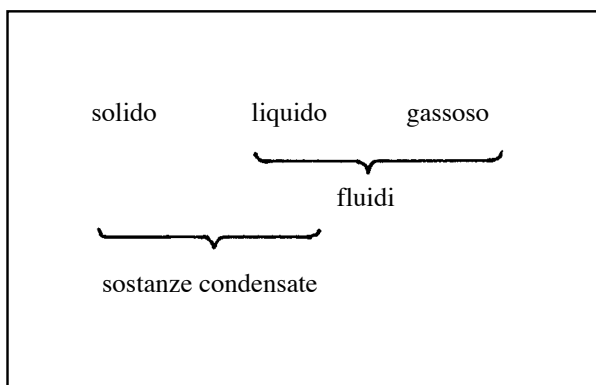


Fig. 13.1. Due suddivisioni in classi di sostanze

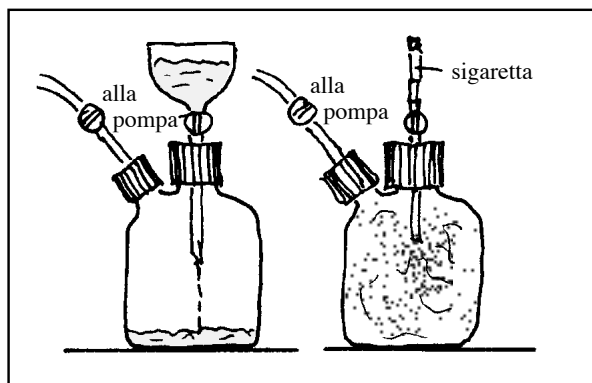


Fig. 13.2. I gas occupano tutto lo spazio a disposizione, i liquidi no

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.

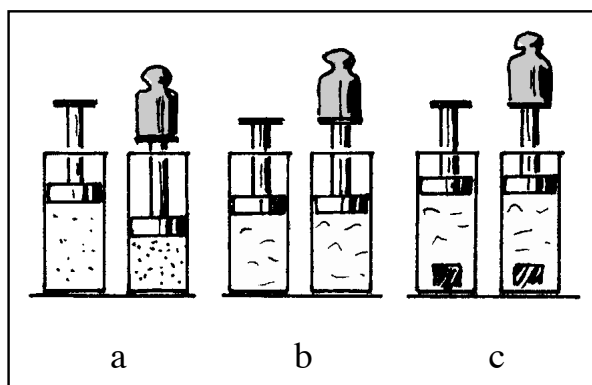


Fig. 13.3. I gas (a) sono comprimibili, i liquidi (b) e i solidi (c) non lo sono.

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

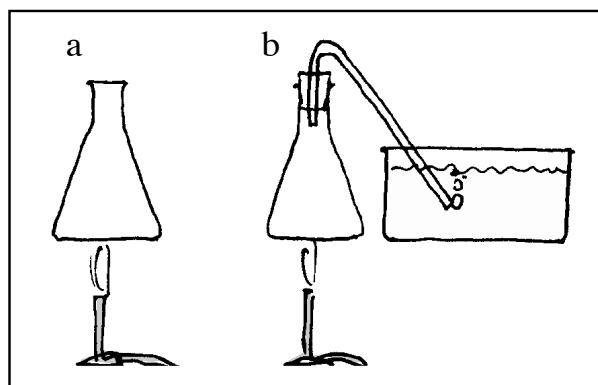


Fig. 13.4. I gas si espandono quando si fornisce loro entropia. Nell'esperimento di destra, viene reso visibile il traboccare dell'aria dal recipiente.

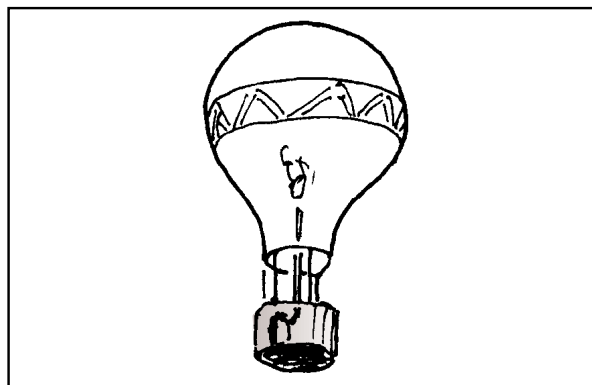


Fig. 13.5. Mongolfiera (per l'esercizio 2)

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:

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

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

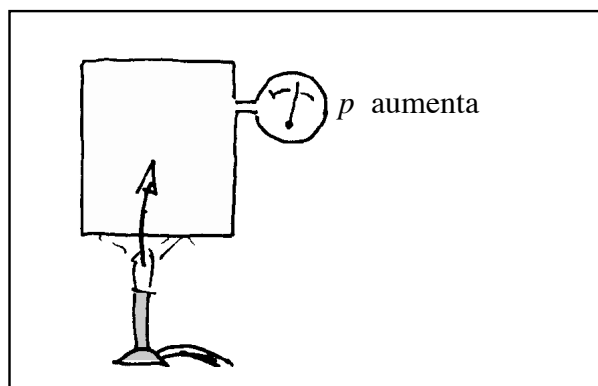


Fig. 13.6. Se forniamo entropia a un gas a volume costante, la sua pressione aumenta.

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

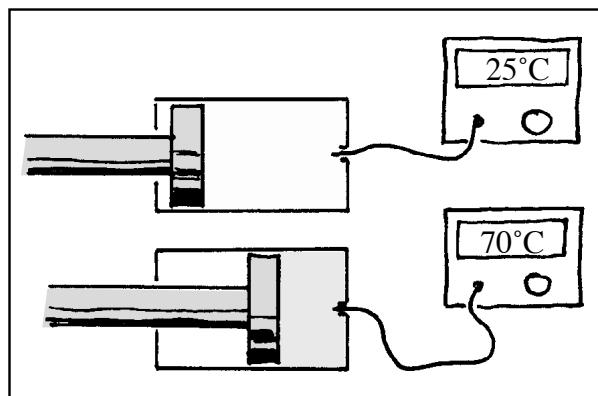


Fig. 13.7. Comprimendo un gas, la sua temperatura aumenta.

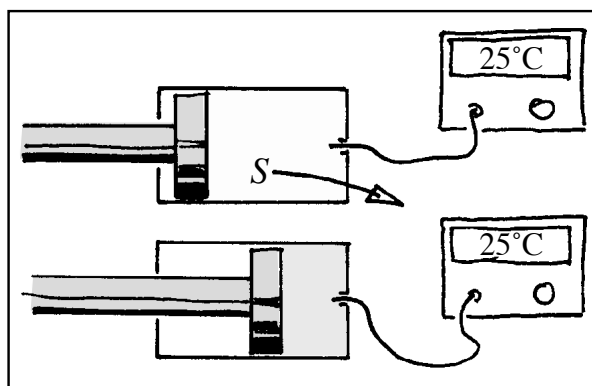


Fig. 13.8. Se spingiamo il pistone nel cilindro molto lentamente, dal gas sfugge entropia.

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

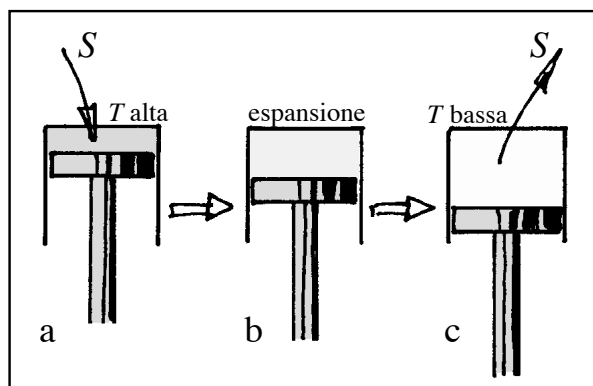


Fig. 13.10. Principio di funzionamento dei motori termici. (a) L'entropia viene fornita a un gas compresso. (b) Il gas si espande. La sua temperatura scende e cede energia. (c) L'entropia viene nuovamente ceduta a temperatura inferiore.

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.

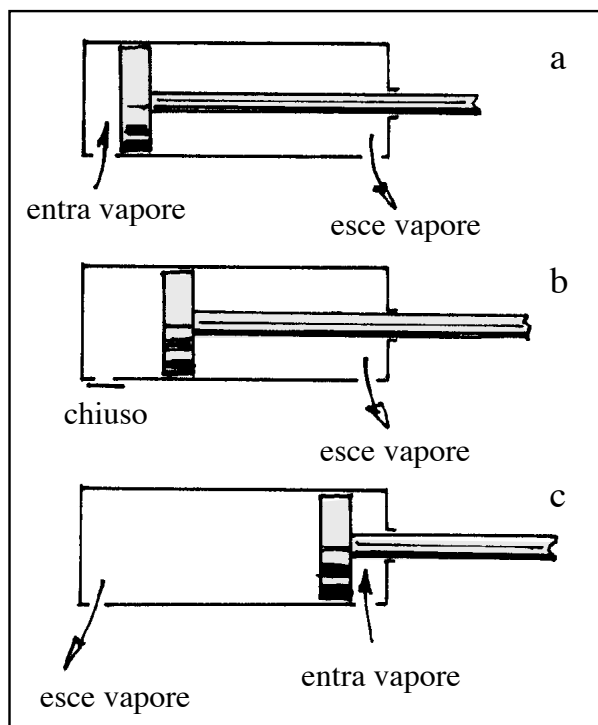


Fig. 13.11. Macchina a vapore in tre diversi istanti.

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-

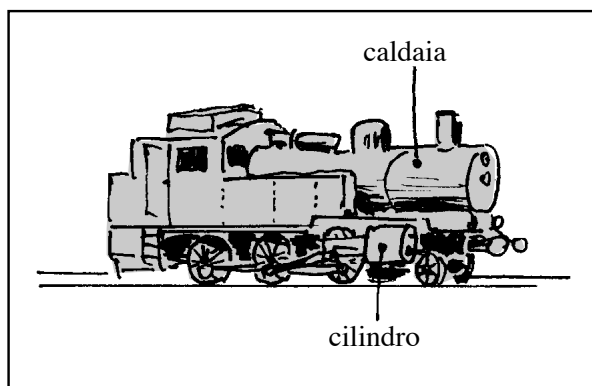


Fig. 13.12. Locomotiva a vapore.

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;

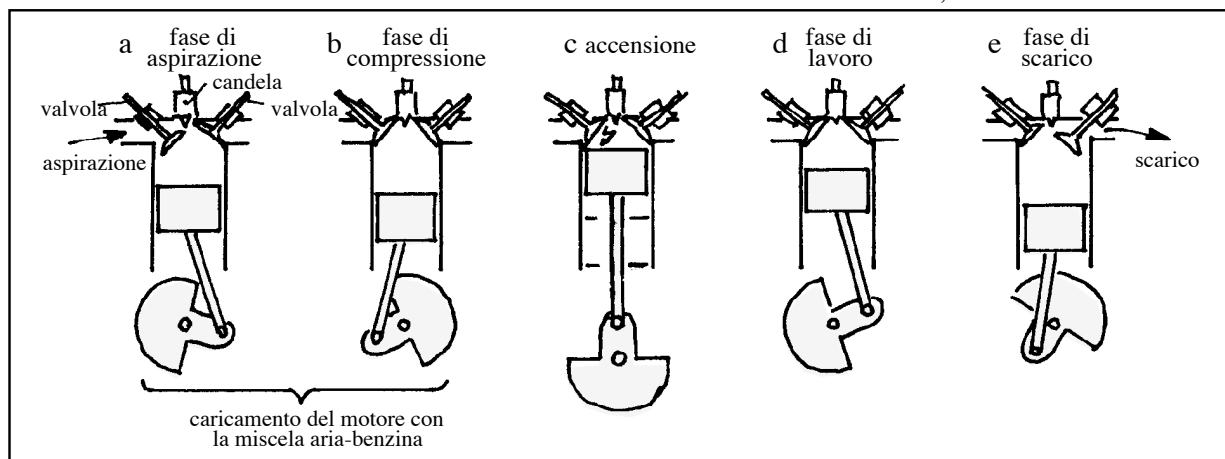


Fig. 13.13. Motore a scoppio in cinque diversi istanti del suo ciclo.

- 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, cederebbe 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

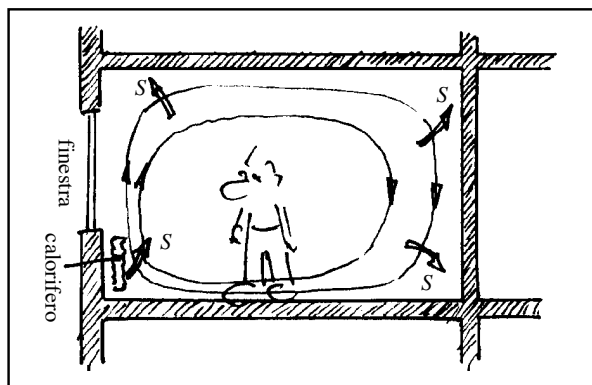


Fig. 13.14. Correnti di convezione termica in un locale riscaldato.

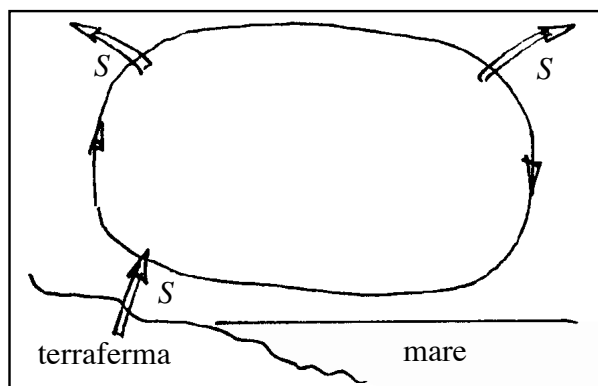


Fig. 13.15. Il suolo è riscaldato molto dal Sole, il mare molto debolmente. Si forma una corrente di convezione.

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.

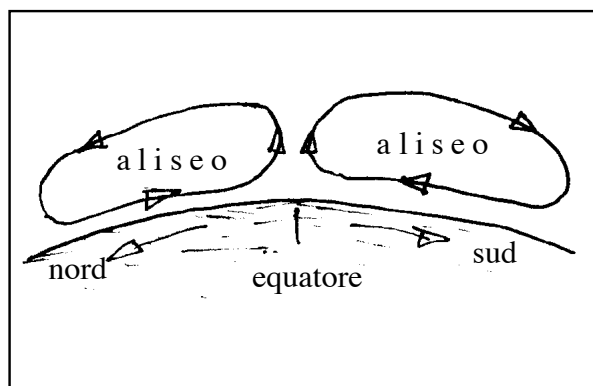


Fig. 13.16. Sulla formazione degli alisei.

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?

14. La luce

14.1 Trasporto di entropia attraverso lo spazio privo d'aria.

Di solito un oggetto caldo si raffredda da solo, la sua entropia defluisce nell'ambiente: nell'aria e nel supporto su cui poggia. Vogliamo impedire questo raffreddamento. Facilissimo, potremmo pensare: basta mettere l'oggetto sotto vuoto, fig. 14.1. L'entropia non può più sfuggire attraverso l'aria. Inoltre abbiamo appeso l'oggetto, che chiameremo O, a dei fili lunghi e sottili che sono solo una minima falla per l'entropia.

E qui osserviamo una cosa curiosa: primo, la campana a vuoto diventa chiaramente più calda e secondo, l'oggetto O si raffredda (come possiamo constatare se lo togliamo dalla campana a vuoto). In altre parole: l'oggetto caldo ha perso entropia anche in assenza di un collegamento termicamente conduttore.

In linea di massima l'esperimento si potrebbe realizzare anche portando O dove non c'è aria: nello spazio. Ma anche lì l'oggetto si raffredderebbe.

Quindi l'entropia deve essere in grado di muoversi attraverso lo spazio privo d'aria in un qualche collegamento invisibile o con un portatore invisibile. Come si forma questo collegamento, qual è il portatore, si scopre facilmente riscaldando ulteriormente O, al punto da renderlo incandescente. Quando è incandescente emette qualcosa che noi tutti conosciamo: luce. La luce addirittura passa particolarmente bene attraverso lo spazio privo d'aria. Supera ad esempio i 150 milioni di chilometri tra il Sole e la Terra quasi senza perdite. La luce che proviene da

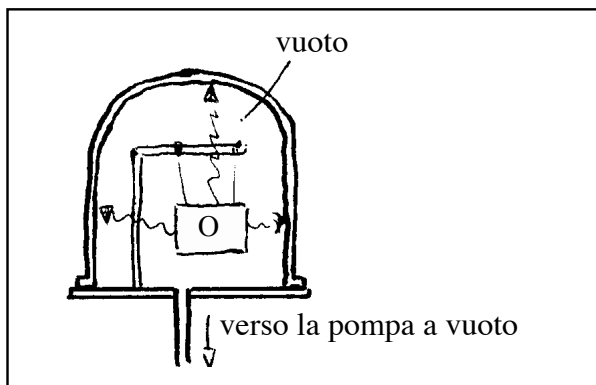


Fig. 14.1. L'oggetto O si raffredda anche se attorno a lui è stato fatto il vuoto.

un oggetto caldo porta quindi anche entropia. Di conseguenza un oggetto radiante cede incessantemente entropia.

Il nostro problema però non è ancora risolto del tutto: l'oggetto O considerato all'inizio non era per niente incandescente. Quindi non emetteva luce. Oppure sì?

Prima di rispondere dobbiamo ancora scoprire una cosa che riguarda la luce.

14.2 Tipi di luce

Dirigiamo su un prisma di vetro un sottile raggio di luce solare, o di luce di una lampadina a incandescenza, o di una lampada ad arco e lo raccogliamo su uno schermo bianco posto a una certa distanza dietro il prisma. Quello che vediamo non è una macchia bianca come forse ci saremmo aspettati, ma una striscia colorata, uno *spettro*, fig. 14.2.

La luce del Sole e quella delle lampade è composta da molti tipi di luce. Questi diversi tipi di luce stimolano nel nostro occhio diverse sensibilità cromatiche. Se tutti i tipi di luce arrivano mescolati al nostro occhio, percepiamo il "bianco".

Il prisma però, devia i vari tipi di luce in maniera diversa, scompone la luce. La luce rossa è quella che il prisma devia di meno. Poi seguono la luce aran-

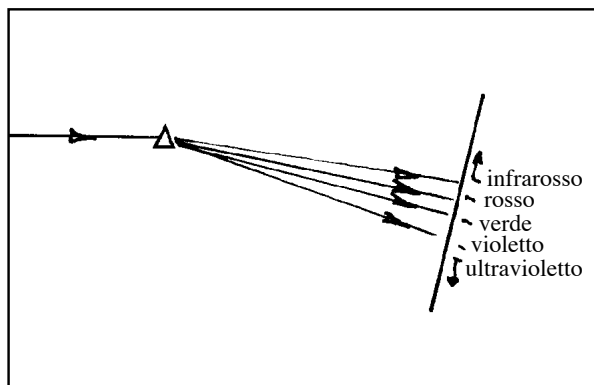


Fig. 14.2. Grazie a un prisma di vetro, la luce bianca viene scomposta nelle sue componenti.

cione, quella gialla, quella verde e quella blu. La luce viola infine è quella che viene deviata maggiormente.

La luce che possiamo percepire con gli occhi è comunque solo una piccola parte tra tutti i tipi di luce presenti in natura e che possiamo anche generare con mezzi tecnici. Oltre alla luce visibile ci sono molti tipi di luce per i quali non abbiamo degli organi sensoriali. Tutti questi tipi di radiazione, visibile e non visibile, vengono chiamati "radiazione elettromagnetica".

Anche la luce solare e la luce delle lampade contengono radiazione non visibile e anche quella viene deviata dal prisma. Grazie a speciali apparecchi di misurazione si può provarne la presenza. Constatiamo che c'è "luce" che viene deviata più del viola. Questa radiazione è detta *radiazione ultravioletta*. E c'è "luce" che viene deviata meno della luce rossa: la *radiazione infrarossa*.

Quali tipi di luce vengono emessi da un corpo e quanta ne emette, dipende dalla temperatura del corpo.

Più un corpo è caldo, più la sua temperatura è alta, più luce al secondo emette. Solo alla temperatura di 0 K non emette più niente.

Inoltre la composizione della radiazione cambia se cambia la temperatura del corpo radiante. La superficie del Sole ha una temperatura di circa 5800 K. La maggior parte della luce che irradia è luce visibile. Il filamento di una lampadina a incandescenza ha una temperatura di circa 3000 K. Per lui la componente di luce infrarossa è molto più grande in rapporto alla luce visibile. Se il corpo radiante ha una temperatura di circa 1100 K ($\approx 800^\circ\text{C}$) è al calor rosso. Della luce visibile resta solo la luce rossa, la maggior parte è luce infrarossa. Sotto i 900 K ($\approx 600^\circ\text{C}$) un oggetto emette solo luce infrarossa.

Più la temperatura di un corpo è elevata, più radiazione elettromagnetica emette.

Se avesse la temperatura della superficie del Sole (5800 K) la maggior parte della radiazione sarebbe luce visibile. Più si scende con la temperatura del corpo radiante, più piccola è la parte di luce visibile e più grande quella di luce infrarossa. Sotto i 900 K non emette che luce infrarossa.

14.3 Trasporto di entropia e di energia con la luce

Torniamo al nostro corpo O che si raffredda sottovuoto. Abbiamo constatato che O emette luce, visibile o anche non visibile, che può attraversare il vuoto. Evidentemente - visto che si raffredda - O cede entropia che deve essere portata via dalla luce.

Ma sappiamo da tempo che l'entropia è un portatore di energia. Dove fluisce entropia fluisce sempre

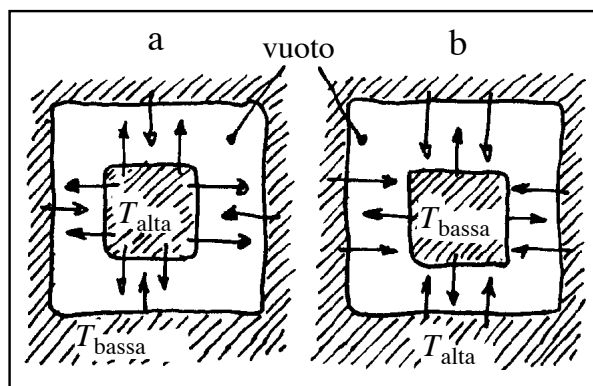


Fig. 14.3. Anche in uno spazio privo d'aria, tra i corpi si instaura l'equilibrio termico.

anche energia. Quindi, il corpo che si raffredda con la luce cede sia entropia che energia.

La luce (visibile e non visibile) trasporta entropia e energia.

Sulla base dei ragionamenti appena fatti potremmo trarre una conclusione errata. Se ogni corpo con una temperatura superiore a 0 K irradia entropia, allora se messo sottovuoto dovrebbe raffreddarsi sempre più fino a raggiungere 0 K. Questo però non succede. Al contrario: se portiamo un corpo O a una temperatura inferiore alla temperatura ambiente e poi lo mettiamo sottovuoto (come in fig. 14.1), non si raffredda. Anzi, addirittura si riscalda.

Si riscalda anche se cede entropia. Come si può spiegare? Abbiamo dimenticato di tener conto di una cosa: non è solo il nostro oggetto O a irradare ma anche tutti gli oggetti attorno. Con la radiazione emessa, O cede entropia - ma riceve anche entropia, con la radiazione emessa dai corpi che ha attorno. Se la temperatura di O è superiore alla temperatura ambiente, O cede all'ambiente più entropia di quanta ne riceva, fig. 14.3a. Se la sua temperatura è inferiore a quella dei corpi che ha intorno, riceve più entropia di quanta ne ceda, fig. 14.3b. In entrambi i casi quindi, la "corrente netta di entropia" va dalla temperatura più alta a quella più bassa. E in entrambi i casi anche il risultato finale è lo stesso: le temperature si uguagliano, si instaura l'equilibrio termico.

La corrente (netta) di entropia scorre da punti a temperatura alta verso punti a temperatura più bassa anche quando il trasporto di entropia avviene per radiazione elettromagnetica.

Esercizio

Un corpo C viene posto tra due pareti parallele A e B che sono a temperature diverse T_A e T_B , fig. 14.4. T_A è maggiore di T_B .

- Cosa si può dire della temperatura assunta da C?
- Cosa si può dire delle correnti di energia tra le pareti e di quelle tra il corpo C e le pareti?

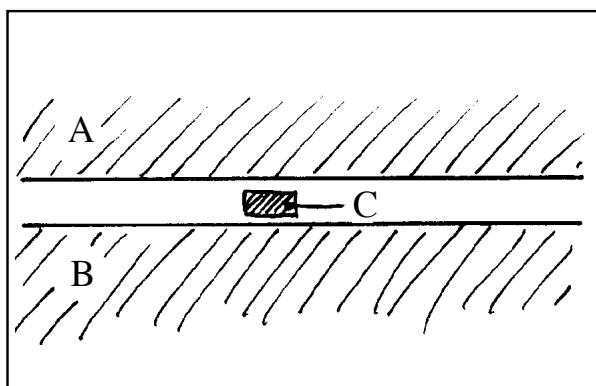


Fig. 14.4. Per l'esercizio alla fine del paragrafo 14.3.

14.4. La temperatura della luce

La luce emessa da un corpo ha la stessa temperatura del corpo. Così la luce che proviene dalla superficie del Sole ha la temperatura della superficie del Sole, cioè circa 6000 K. Questa affermazione non sembra molto plausibile: se la luce solare avesse questa temperatura, non dovrebbe bruciare istantaneamente tutto ciò che è esposto alla radiazione solare? E se questa è la temperatura della luce solare, allora la si dovrebbe poter misurare anche esponendo un termometro al Sole.

Per risolvere questo problema dobbiamo capire meglio come utilizzare un termometro. Per misurare la temperatura di un oggetto o di una sostanza, l'oggetto o la sostanza devono essere messi in contatto con il termometro. Se teniamo semplicemente un termometro alla luce del Sole, il termometro è sì in contatto con la luce solare - la luce solare "tocca" il termometro - ma viene toccato anche da altre cose.

Innanzitutto c'è l'aria. Anche lei tocca il termometro. Quale temperatura indicherà il termometro? Quella dell'aria o della radiazione solare? Il termometro farà un compromesso e indicherà una temperatura che non è né quella dell'aria, né quella della luce del Sole.

Possiamo provare ad aiutarci pompando tutta l'aria da un recipiente trasparente e mettendovi il termometro. La temperatura che indica ora è comunque ancora lontana dai 6000 K attesi. È normale poiché

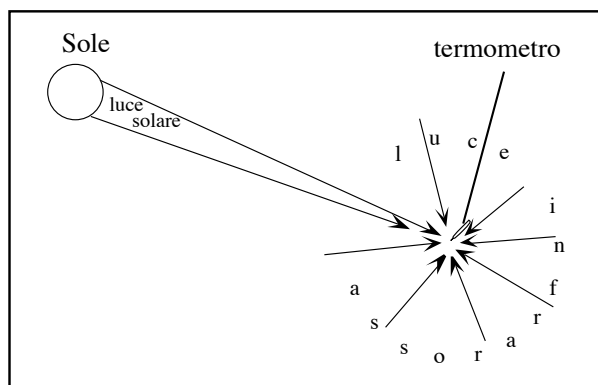


Fig. 14.5. La luce del Sole proviene da una sola direzione. Da tutte le altre direzioni proviene radiazione infrarossa a 300 K.

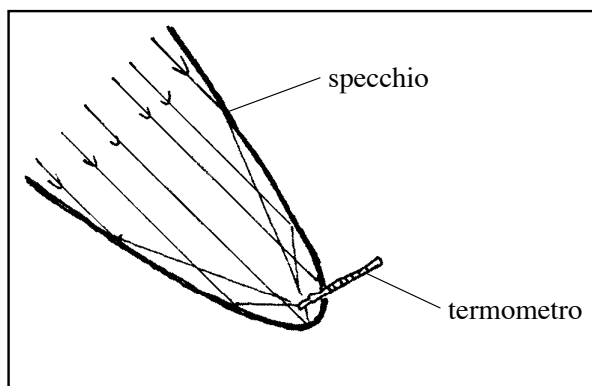


Fig. 14.6. Lo specchio parabolico fa in modo che la luce solare colpisca il termometro da tutte le direzioni.

abbiamo di nuovo tralasciato qualcosa. In effetti il termometro fa ancora un compromesso: oltre che con la luce solare il termometro è in contatto termico anche con la radiazione infrarossa dell'ambiente. Questa radiazione è a temperatura ambiente, cioè circa 300 K. E, mentre la radiazione solare lo colpisce da una sola direzione, la luce a 300 K giunge al termometro da angolazioni diverse, fig. 14.5. Quindi è normale che anche questa volta la misurazione sia nettamente in favore della temperatura ambiente.

Ma allora come possiamo misurare la temperatura della luce solare? Dobbiamo fare in modo che la luce giunga al termometro da tutte le direzioni, non solo da alcune, e lo facciamo usando lenti o specchi, fig. 14.6. Il termometro indicherà la temperatura del Sole se dal suo punto di vista il Sole è visibile in tutte le direzioni (naturalmente i nostri normali termometri non sono più adatti).

Sai che con una lente si possono ottenere temperature molto elevate focalizzando la luce solare in un piccolo punto, per esempio su un pezzo di legno. Possiamo descrivere il processo in questo modo: tentiamo di esporre il legno alla luce solare da tutte le direzioni, in modo che il legno assuma la temperatura della luce. Naturalmente nei fatti, usando una comune lente, la luce non giunge al legno da tutte le direzioni ma ancora da una regione limitata. Quindi il legno raggiunge una temperatura abbastanza elevata ma sempre ben lontana da quella della luce.

14.5 Bilancio entropico e bilancio energetico della Terra

Assieme alla luce, la Terra riceve continuamente dal Sole entropia e quindi anche energia.

L'intensità della corrente di energia che, venendo dal Sole, cade su un metro quadrato di superficie terrestre è un numero importante e anche facile da ricordare: vale circa 1 kW. Si dice anche che la *costante solare* vale 1 kW/m². La superficie di un metro quadrato considerata dev'essere perpendicolare ai raggi del Sole, fig. 14.7. Ovviamente se è di

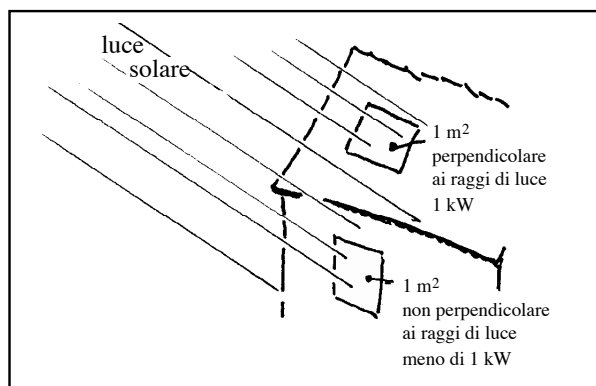


Fig. 14.7. Su una superficie di 1 m² perpendicolare alla direzione della luce solare, l'intensità della corrente di energia incidente è 1 kW

sbieco riceve meno di 1 kW. Inoltre questo valore della costante solare è valido solamente con cielo sereno.

Costante solare $\approx 1 \text{ kW/m}^2$

Ora, se la Terra non cedesse né energia né entropia, dovrebbe riscaldarsi sempre più - e non lo fa. Come riesca a mantenere costante la sua temperatura è chiaro: visto che la sua temperatura non è 0 K, emette lei stessa luce infrarossa e, con la luce, entropia e energia.

Mentre la luce solare giunge alla Terra solo da una parte, la Terra emette in tutte le direzioni, fig. 14.8.

Visto che la Terra non si riscalda e non si raffredda, la corrente di energia che viene emessa deve avere la stessa intensità di quella che viene ricevuta:

$$P_{\text{entra}} = P_{\text{esce}}$$

Con l'entropia non è così facile. Sulla Terra viene prodotta molta entropia. Quindi la luce emessa deve portare più entropia della luce solare ricevuta. Oltre all'entropia proveniente dal Sole, la luce infrarossa emessa deve portar via nello spazio anche tutta l'entropia prodotta sulla Terra, in modo che il contenuto di entropia della Terra resti costante:

$$I_{\text{S esce}} = I_{\text{S entra}} + I_{\text{S prodotta}}$$

Il bilancio energetico e il bilancio entropico della Terra sono descritti dalle stesse equazioni dei bilanci corrispondenti per la sbarra di fig. 11.7, vedi paragrafo 11.3.

Possiamo anche paragonare la Terra a una casa riscaldata. La caldaia della casa fornisce una determinata corrente di energia e una determinata corrente di entropia. L'intera corrente di energia esce dalla casa a causa delle varie perdite di calore. Con questa corrente di energia non se ne va solo l'entropia ceduta dal riscaldamento, ma anche l'entropia prodotta nella casa e nelle pareti.

Visto che la corrente di entropia che esce dalla Terra, risp. dalla casa, assume un valore costante nel tempo, si tratta di *equilibrio dinamico*.

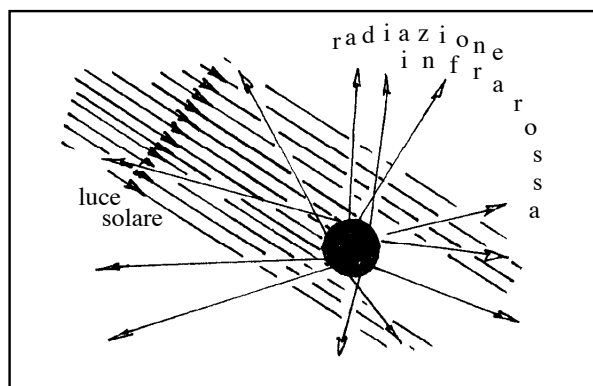


Fig. 14.8. La Terra riceve luce solare da una sola direzione e irradia in tutte le direzioni.

14.6 L'effetto serra

L'atmosfera è notoriamente trasparente alla luce visibile. (Altrimenti sarebbe buio anche di giorno e non solo di notte.) Per contro l'atmosfera lascia passare male la radiazione infrarossa. La colpa è principalmente della piccola quantità di anidride carbonica contenuta nell'atmosfera. Quindi l'anidride carbonica - in simboli chimici CO_2 - è una specie di materiale isolante per la radiazione infrarossa. Vogliamo analizzare cosa succede quando il contenuto in CO_2 dell'atmosfera aumenta in seguito a un qualsiasi evento.

La luce solare incidente non ne è toccata: la Terra viene riscaldata dal Sole come prima. Invece la perdita di calore inizialmente diminuisce, in quanto la radiazione non riesce più a passare tanto facilmente. In questo modo la temperatura aumenta. A sua volta temperatura elevata significa emissione più intensa di radiazioni. L'emissione aumenta sempre più - e lo fa fino a riprendere il suo vecchio valore: fino a quando la corrente di energia emessa e quella ricevuta hanno di nuovo la stessa intensità. Il nuovo equilibrio dinamico si distingue dal vecchio (prima che aumentasse il contenuto in CO_2) per la temperatura: la temperatura è aumentata.

Più il contenuto in CO_2 dell'atmosfera è alto, più la temperatura che si instaura sulla Terra è elevata.

Come chiarimento confrontiamo ancora una volta la Terra con una casa riscaldata. Se miglioriamo l'isolazione della casa senza ridurre il riscaldamento, la temperatura in casa si assesta su un valore più alto. Ma a questa temperatura più elevata la corrente di energia che defluisce a causa delle perdite di calore ha nuovamente la stessa intensità della corrente di energia fornita dal riscaldamento.

Il contenuto di CO_2 dell'atmosfera è di circa 0,03% (lo 0,03 % delle molecole dell'aria sono molecole di CO_2). Al momento la componente CO_2 dell'aria sta aumentando fortemente: la combustione di carbone nelle centrali elettriche, di olio combustibile negli impianti di riscaldamento delle case e dei carburanti (benzina e gasolio) nei motori delle automobili, genera CO_2 . L'anidride carbonica

viene scomposta dalle piante, che così producono ossigeno. Attualmente però la scomposizione del CO_2 da parte delle piante sta diminuendo a causa del continuo abbattimento di nuove aree di foresta tropicale. Quindi si deve presupporre che nei prossimi decenni la temperatura della Terra aumenterà. Anche se l'aumento è solo di pochi $^\circ\text{C}$ può avere gravi conseguenze. Alcune parti dei ghiacci polari potrebbero sciogliersi. Il livello del mare aumenterebbe e il mare inonderebbe vasti territori.

Questo fenomeno per cui l'atmosfera lascia passare la luce del Sole ma non la radiazione infrarossa emessa dalla Terra, è detto *effetto serra*. Infatti nelle serre si svolge lo stesso processo, ma con il vetro al posto dell'atmosfera. Anche il vetro è trasparente alla luce visibile ma non alla luce infrarossa. Trattiene la radiazione infrarossa generata nella serra e quindi la temperatura nella serra è più elevata che se il vetro fosse trasparente alla luce infrarossa.

Esercizio

Se il contenuto in CO_2 della Terra dovesse cambiare, sulla Terra si instaurerebbe una nuova temperatura. Nel capitolo 4 avevamo una situazione del tutto analoga: avevamo cambiato la resistenza all'aria di un corpo. Così facendo la velocità del corpo si era assestata su un altro valore. Di che processo si tratta? Confronta i due fenomeni.

Indice analitico

- addizione vettoriale 69
- affondare 57, 109
- airbag 44
- assenza di peso 54 segg.
- attrito 28, 33

- bar 17
- baricentro 86 segg., 89 segg.
- barometro 18
- bollire 142
- braccio della leva 81

- caduta con attrito 52
- caduta libera 51
- calore 117
 - pompa di 120, 130
 - quantità di 117
- campo gravitazionale 49, 62
- campo magnetico 33
- capacità termica specifica 139
- carnot 118
- carrucola 77
- cella solare 13
- centrale a carbone 134
 - elettrica 10
 - idroelettrica 62
 - nucleare 134
 - solare 134
 - termica 134
- cintura di sicurezza 44
- circuito 11
- climatizzatore 120
- combustibile 9
- compressione (tensione di) 36 segg., 101
- compressore 11
- comprimibilità 145
- condensare 141
- convezione 127
- convezione termica 150
- corda 32, 74 segg.
- corrente del Golfo 128
- costante locale 50
- costante solare 155

- densità 56 segg., 105, 146
- diffusione 142
- dilatazione termica 146
- dinamometro 39

- effetto serra 156
- elettricità 9 segg.

- energia 9 segg.
 - contenitori di 14, 61 segg.
 - corrente di 14
 - diagramma di flusso della 11
 - intensità della corrente di 14
 - perdita di 135 segg.
 - portatori di 9 segg., 59 segg., 100 segg., 129 segg.
 - ricevitore di 10
 - sorgente di 10
 - trasferitore di 12 segg.
 - trasporto convettivo di 127
 - trasporto idraulico di 22, 112
- entropia 117 segg.
 - come portatore di energia 127 segg.
 - contenitore di 143
 - contenuto di 137
 - corrente di 117 segg.
 - intensità della corrente di 124
 - produzione di 122, 131, 136
 - sorgente di 134
- equilibrio 87
 - dinamico 35, 53, 154
 - di pressione 18
 - instabile 88
 - stabile 88
 - termico 119
- evaporare 142

- fluido 145
- forza 40
 - di gravità 50
 - peso 50
- frazioni delle unità di misura 26
- freddo da evaporazione 143
- freni 33
- frigorifero 120, 144

- galleggiare 57, 109
- gas 145 segg.
- generatore 12
- grandezza fisica 9, 25

- huygens 27

- intensità della corrente 19 segg.
- inversione di spinta 34

- joule 9

- kelvin 122

lago artificiale 58
 legge di Hooke 42
 legge della leva 81
 luce 153 segg.
 - tipi di 153
 Luna 71

macchina a vapore 135, 148
 macchina del freddo 121
 manometro 17
 martello pneumatico 11
 massa 27
 miscela refrigerante 143
 molla 42, 61
 - costante della 42
 momento meccanico 82 segg.
 motore a combustione interna 135
 - a reazione 34, 135
 - a scoppio 149
 - diesel 147
 - termico 133 segg., 148
 multipli delle unità di misura 26

newton 39
 nodo 20

oscillazione 63

paracadute 54
 paranco 79
 pascal 17
 pianeti 71
 pompa 19
 portatore di energia del tipo "vuoto a perdere" 11
 portatore di energia del tipo "vuoto a rendere" 11
 pressione 17, 101 segg.
 - gravitazionale 105 segg.
 - normale 17
 processo irreversibile 124

quantità di moto 25 segg.
 - circuito di 37
 - come portatore di energia 61 segg.
 - conduttore di 32
 - corrente di 32
 - intensità della corrente di 39 segg.
 - longitudinale 72
 - non conduttore di 32
 - pompa di 30 segg.
 - trasversale 72

quantità di moto angolare 12, 93 segg.
 - circuito di 99 segg.
 - come portatore di energia 102 segg.
 - conduttore di 97 segg.
 - corrente di 93 segg.
 - pompa di 95

radiazione infrarossa 154
 radiazione ultravioletta 154
 razzo 34
 reazione chimica 123
 regola dei nodi 20
 - per le correnti di quantità di moto 40, 75
 regola della mano destra 95
 resistenza 21
 - di reazione 123
 - termica 125, 132
 ruota 33, 72
 riscaldamento centrale 10, 127

satellite 71
 scavatrice 12, 22
 sonda spaziale 72
 sovrappressione 17
 spinta 18, 118
 spinta idrostatica 108 segg.
 superconduttore 38
 Système International 48

tachimetro 45
 temperatura 117 segg.
 - assoluta 121
 - di ebollizione 141
 - di fusione 141
 tenaglia 83
 tensione meccanica 101
 torsione (tensione di) 98
 transizione di fase 141 segg.
 trazione (tensione di) 36 segg., 101
 turbina 133 segg.
 turbina idraulica 12

velocità 26, 44
 - angolare 93
 - limite 53
 vettore 65 segg.
 volano 96
 vuoto 17

watt 14