

Der Karlsruher Physikkurs



Volume 2

Dati
Elettricità
Luce

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 2

Edizione italiana: settembre 2006

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

Traduzione: Paolo Pianezzi

Disegni : F. Herrmann

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

Indice

DATI

15. Dati e portatori di dati	9
15.1 Trasporto di dati	9
15.2 La quantità di dati	13
15.3 Esempi di trasporto di dati	16
15.4 L'intensità della corrente di dati	18
15.5 Contenitori di dati	19

ELETTRICITÀ

16. Elettricità e correnti elettriche	25
16.1 Il circuito elettrico	25
16.2 L'intensità della corrente elettrica	27
16.3 La regola dei nodi	28
16.4 Il potenziale elettrico	30
16.5 Lo zero del potenziale	32
16.6 Spinta e intensità di corrente	33
16.7 Problemi elettrotecnici	34
16.8 La resistenza elettrica	36
16.9 Il corto circuito - L'interruttore salvavita	39
16.10 Corrente alternata	40
16.11 I pericoli della corrente elettrica	41
17. Elettricità ed energia	43
17.1 L'elettricità come portatore di energia	43
17.2 La resistenza dei conduttori - Perdite di energia nei conduttori	46
18. Il campo magnetico	49
18.1 Alcuni semplici esperimenti con aghi e magneti	49
18.2 Poli magnetici	50
18.3 Linee di magnetizzazione	51
18.4 Il campo magnetico	53
18.5 La rappresentazione grafica dei campi magnetici	54
18.6 Linee di magnetizzazione e linee di campo	55
18.7 Campo magnetico e materia	56
18.8 L'energia del campo magnetico	57
18.9 Corrente elettrica e campo magnetico	58
18.10 L'elettromagnete	59
18.11 Il motore elettrico	62
18.12 Il campo magnetico terrestre	63
18.13 L'induzione	63
18.14 Il generatore	64
18.15 Il trasformatore	65
18.16 Le correnti indotte dal campo magnetico	66
18.17 Superconduttori	67

19. Elettrostatica	69
19.1 Carica e portatore di carica	69
19.2 Corrente di carica e corrente del portatore di carica	70
19.3 L'accumulazione di carica elettrica	70
19.4 Il campo elettrico	72
19.5 Il condensatore	74
19.6 La capacità	75
19.7 Il tubo catodico	76
19.8 L'elettricità atmosferica	77
20. La tecnica dei dati	79
20.1 L'amplificatore	79
20.2 L'elaborazione di dati	82
20.3 Generalizzazione della definizione di quantità di dati	87

LUCE

21. La luce	93
21.1 Sorgenti luminose	93
21.2 Alcune proprietà della luce	93
21.3 Quando la luce incontra la materia	96
21.4 Luce diffusa e luce coerente	99
21.5 La legge della riflessione	100
21.6 Lo specchio piano	101
21.7 Lo specchio parabolico	102
21.8 La rifrazione	104
21.9 Il prisma	106
21.10 Riflessione totale	107
22. La formazione di immagini	109
22.1 Che cos'è un'immagine?	109
22.2 La camera oscura	111
22.3 La relazione tra le dimensioni dell'oggetto e le dimensioni dell'immagine	112
22.4 Il perfezionamento della camera oscura	112
22.5 La lente	114
22.6 Le immagini attraverso le lenti	114
22.7 Lunghezza focale e potere diottrico	116
22.8 Le lenti composte	117
22.9 La profondità di campo	118
22.10 Gli obiettivi	119
22.11 La macchina fotografica	119
22.12 L'occhio	121
22.13 Occhiali e lenti di ingrandimento	122
22.14 Proiettore per diapositive e lavagna luminosa	123
22.15 Cineprese, macchine da proiezione, telecamere, videocamere	124
22.16 Il microscopio	125
22.17 Il cannocchiale	125
22.18 Il telescopio	126

23. I colori	127
23.1 Lo spazio tridimensionale dei colori	127
23.2 Le mescolanze di luce	129
23.3 Come si inganna l'occhio - l'immagine televisiva	131
23.4 Ancora sullo spazio dei colori	132
23.5 Gli spettri	133
23.6 La relazione tra lo spettro e la percezione dei colori	134
Indice analitico	137

D a t i

15. Dati e portatori di dati

15.1 Trasporto di dati

Ogni casa è collegata con l'esterno grazie a condutture e aperture. Nelle figg. 15.1 e 15.2 è rappresentata la sezione di una casa e dei suoi collegamenti. Per non rendere l'immagine troppo confusa, una parte dei collegamenti è mostrata in fig. 15.1 e un'altra in fig. 15.2. La suddivisione è stata fatta secondo un criterio ben preciso. Tutti i collegamenti in fig. 15.1 hanno uno scopo comune e tutti quelli in fig. 15.2 hanno un altro scopo comune.

La fig. 15.1 mostra le condutture grazie alle quali la casa viene rifornita di energia:

- i cavi elettrici, che passano dal "contatore elettrico":
- l'apertura per il riempimento della cisterna della nafta;
- la conduttura del gas.

Un uomo porta in casa della legna per il camino. Quindi, a volte l'energia viene portata in casa dalla porta d'entrata. Altre case hanno ulteriori condutture o aperture per l'energia:

- la botola della carbonaia;
- una conduttura per il riscaldamento a distanza;
- una conduttura dove scorre l'acqua calda proveniente dal collettore solare.

Anche i collegamenti rappresentati in fig. 15.2 hanno uno scopo comune: riforniscono gli abitanti della casa con notizie, informazioni, immagini e musica. Diciamo che attraverso queste condutture arrivano alla casa dei *dati*. Nel dettaglio i dati arrivano

- dalla linea telefonica;
- dalla linea dell'antenna TV;
- con giornali e lettere dall'apertura della cassetta della posta;
- attraverso il tetto e le pareti con onde radio, le cosiddette onde elettromagnetiche, che vengono captate dall'antenna della radio a transistor e del telefono cellulare;
- dalla finestra aperta attraverso la quale il vicino ci dice qualcosa.

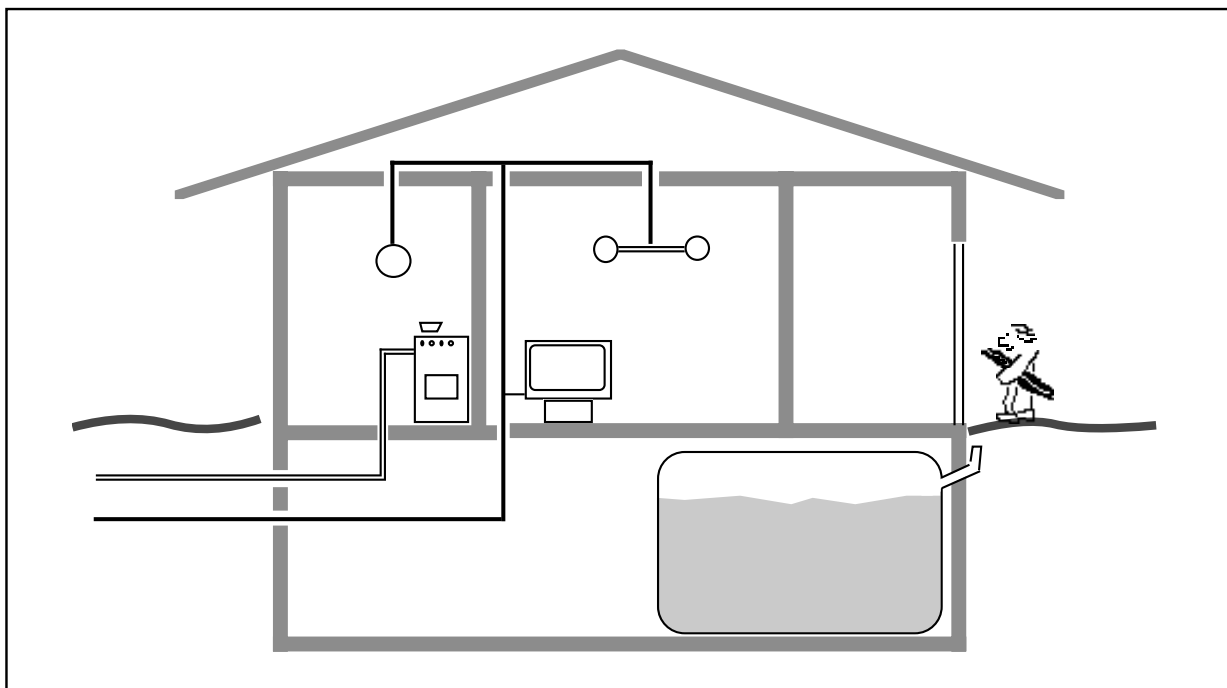


Fig. 15.1. Collegamenti che riforniscono la casa di energia

Tabella 15.1

Sorgente di dati	Portatore di dati	Ricevitore di dati
antenna emittente antenna ricevente corde vocali	onde elettromagnetiche elettricità suono	antenna ricevente televisore microfono

Anche i dati possono entrare in casa dalla porta d'entrata: nella borsetta della donna ci sono un CD e un DVD.

Altre condutture di dati che possono portare dati in casa sono:

- il cavo del campanello;
- il collegamento della televisione via cavo.

Abbiamo già visto che per ogni trasporto di energia ci vuole un portatore di energia. Analogamente, per ogni trasporto di dati ci vuole un *portatore di dati*. Nel caso della casa in fig. 15.2, i dati giungono all'interno della casa con i seguenti portatori:

- elettricità;
- suono;
- onde radio;
- lettere, giornali, ecc.

Inoltre, anche la luce può essere un portatore di dati. Quando guardiamo la televisione, i dati giungono ai nostri occhi con il portatore luce. Anche le conversazioni telefoniche sono in parte trasportate con la luce. In questo caso si usano dei *conduttori ottici* invece dei soliti fili di rame.

Ogni trasporto di dati necessita di un portatore. Elettricità, suono, onde radio e luce possono essere usati come portatori di dati.

Ovviamente ogni messaggio può essere trasportato con un portatore qualsiasi. In fig. 15.3 il messaggio "telefonami" viene trasmesso con quattro diversi portatori.

Ogni trasporto di dati ha un inizio e un termine: una *sorgente di dati* e un *ricevitore di dati*. Se una persona A dice qualcosa a una persona B, A (più precisamente: gli organi vocali di A) è la sorgente di dati e B (più precisamente: l'udito di B) è il ricevitore di dati.

La parola "sorgente" non significa però che i dati vengono prodotti lì; significa solo che lì comincia il trasporto con un determinato portatore. Analogamente la parola "ricevitore" non significa che il trasporto è definitivamente concluso. Significa solo che è finito il trasporto con quel portatore.

Così, i messaggi trasmessi dalla linea telefonica provengono dal microfono di uno dei telefoni. Questo microfono è la sorgente per il trasporto di dati attraverso il cavo (con il portatore elettricità). L'altoparlante dell'altro telefono è il corrispondente ricevitore di dati.

La trasmissione di dati può essere rappresentata con un diagramma di flusso esattamente come la trasmissione di energia. La sorgente di dati e il ricevi-

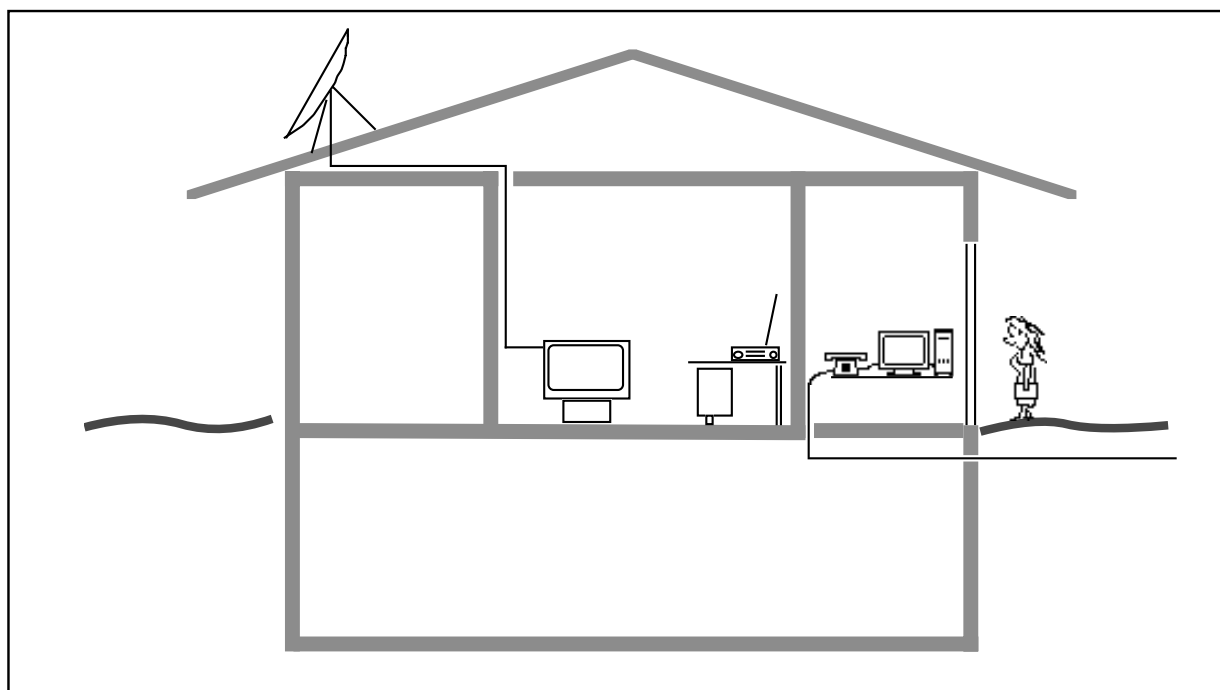


Fig. 15.2. Collegamenti che riforniscono la casa di dati.

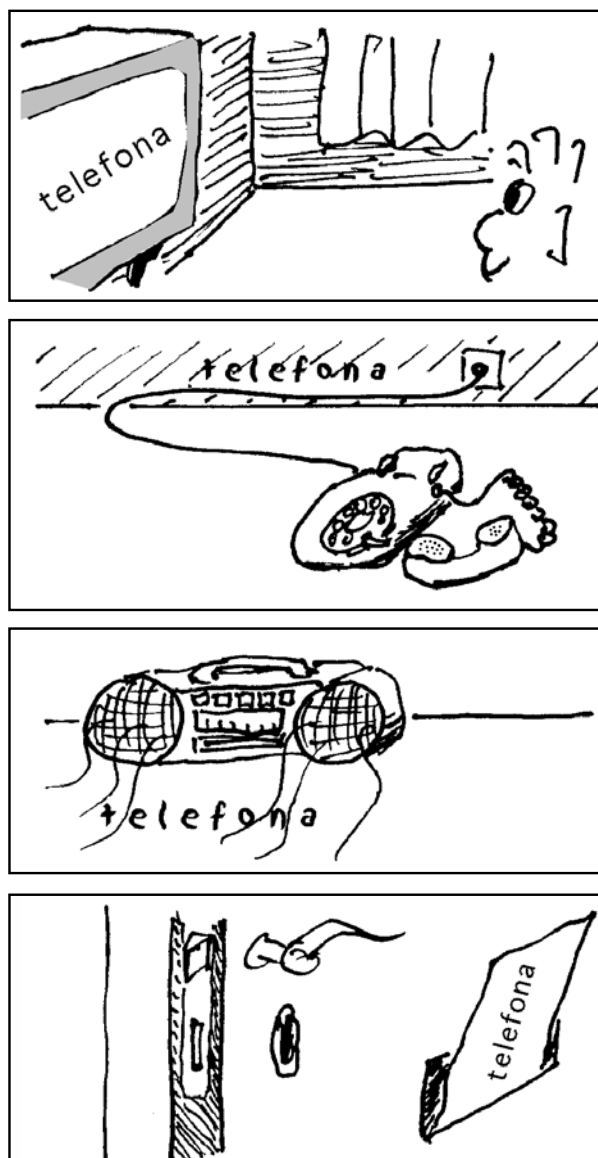


Fig. 15.3. La stessa notizia trasmessa con portatori diversi

tore di dati vengono rappresentati con una scatola, la corrente di dati con una freccia larga e la corrente del portatore di dati con una freccia sottile. La fig. 15.4 mostra tre esempi di diagrammi di flusso dei dati.

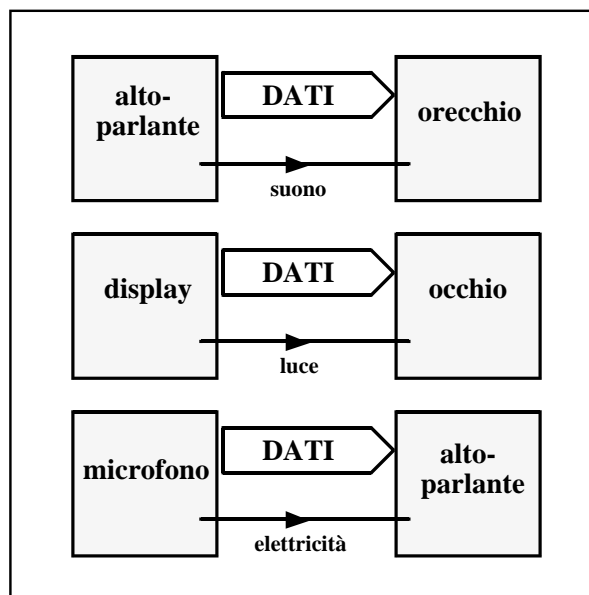


Fig. 15.4. Alcuni diagrammi di flusso dei dati

Altre coppie sorgente-ricevitore, con i rispettivi portatori, sono elencate in tabella 15.1.

Spesso nei trasporti di energia sono coinvolti apparecchi la cui funzione è di trasferire l'energia da un portatore a un altro. Lo stesso vale anche per i trasporti di dati: spesso nei trasporti di dati sono coinvolti apparecchi nei quali i dati vengono trasferiti da un portatore all'altro. Ciò significa che questi apparecchi sono sorgente e ricevitore in uno.

Così, in un altoparlante i dati sono trasferiti dall'elettricità al suono. Quindi l'altoparlante è il ricevitore per un trasporto con il portatore elettricità e la sorgente per un trasporto con il portatore suono. A questo punto la rappresentazione simbolica dei trasferitori di dati viene da sé. La fig. 15.5 mostra alcuni esempi. Alcuni trasferitori di dati con i relativi portatori in entrata e in uscita, sono elencati in tabella 15.2.

Notiamo che per ogni apparecchio che trasferisce dati da un portatore A a un portatore B, ce n'è uno che fa il contrario, cioè che trasferisce i dati dal portatore B all'A. Il microfono è l'opposto dell'altoparlante e la videocamera fa il contrario dello schermo di un televisore.

Tabella 15.2

Trasferitore di dati	Portatori di dati	
	in entrata	in uscita
display a cristalli liquidi	elettricità	luce
fotodiodo	luce	elettricità
clacson, sirena	elettricità	suono
radio	onde elettromagnetiche	suono

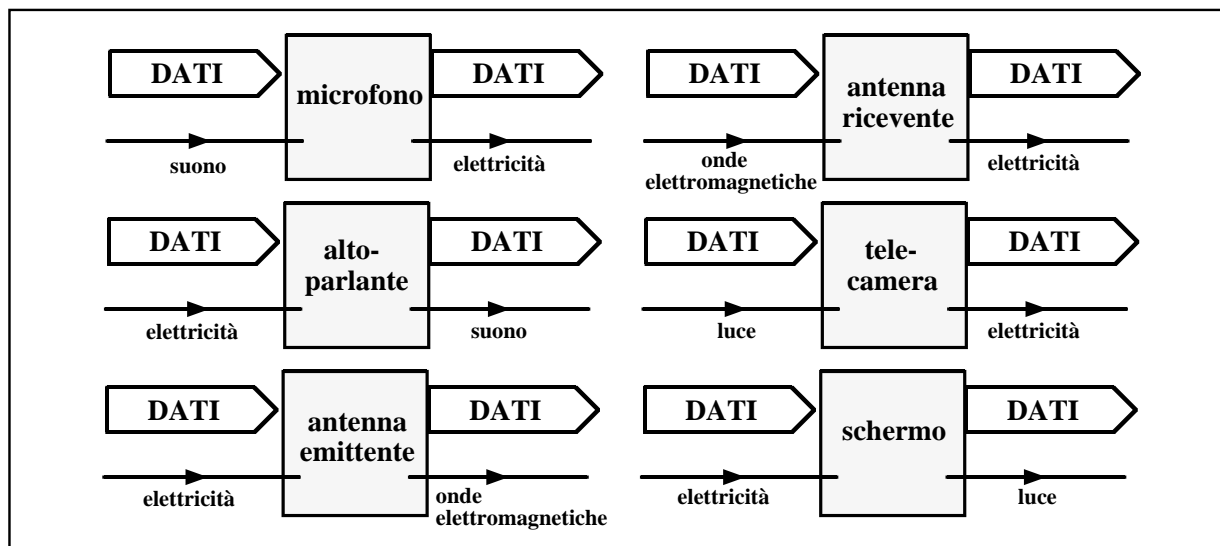


Fig. 15.5. Trasferitori di dati

Alcuni degli apparecchi in fig. 15.5 funzionano solo se è inserita la presa. Attraverso la presa vengono riforniti di energia. Non dobbiamo però confondere questa entrata per l'energia con l'entrata per i dati. Le informazioni e le immagini giungono al televisore via antenna o via cavo e non dalla presa di corrente.

I trasferitori di dati si possono concatenare, esattamente come i trasferitori di energia. Molti trasporti di dati coinvolgono numerosi trasferitori di dati collegati in sequenza. La fig. 15.6 mostra un diagramma di flusso (semplificato) della trasmissione in diretta di una partita di calcio dal Messico a casa vostra.

Dagli esempi considerati sembrerebbe che l'ultimo anello di una catena di trasferitori di dati debba sempre essere una persona. Ma è una supposizione sbagliata. Ci sono trasporti di dati senza che né all'inizio né alla fine ci sia una persona. Questo è il caso per esempio, dei sistemi regolatori. Per regolare la temperatura in un appartamento si piazza in un locale un sensore termico, la sorgente di dati. Questo comunica alla caldaia se si deve bruciare più

o meno olio combustibile. La caldaia è il ricevitore di dati. In questo caso il portatore di dati è l'elettricità.

Se alla fine di una catena di trasferitori di dati c'è un essere umano, o più precisamente: i suoi occhi o il suo udito, allora invece della parola dati se ne usano spesso altre: messaggi, informazioni, testi, musica, immagini, rumore... Per il processo di trasmissione è però irrilevante sapere chi è il destinatario e l'importanza che dà ai dati. Per questo motivo useremo sempre la parola "dati".

Abbiamo detto, "luce, elettricità, suono e onde radio possono essere usati come portatori di dati" e non "luce, ecc. sono portatori di dati". Naturalmente, sapere quando queste grandezze o sostanze vanno definite portatori di dati o portatori di energia, dipende solo da ciò per cui le usiamo.

Così definiremo portatore di energia la luce che colpisce un collettore solare e anche la luce laser con la quale perforiamo una sottile lastra.

Per contro, la luce che scorre in un conduttore ottico trasportando un'immagine televisiva, ha la funzio-

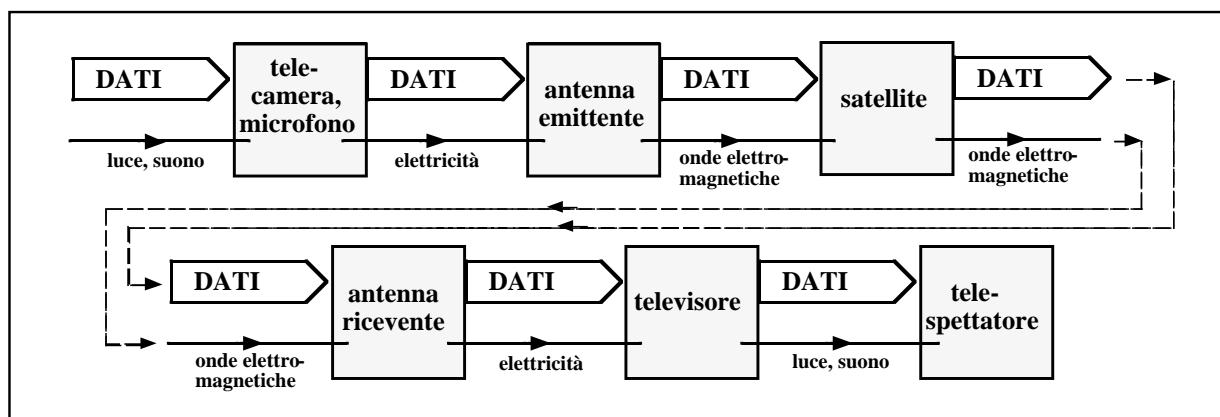


Fig. 15.6. Trasporto di dati con cinque trasferimenti di dati.

ne di portatore di dati. Ovviamente la luce trasporta energia anche in questo caso, ma questo trasporto di energia non è rilevante per l'applicazione.

Stessa cosa per l'elettricità. L'elettricità che affluisce alla casa (più precisamente: attraverso la casa) in fig. 15.1, serve a trasportare energia; ha la funzione di portatore di energia. Invece, nella linea telefonica e nel cavo d'antenna in fig. 15.2 la sua funzione tecnica è quella di portatore di dati.

Come altro esempio possiamo citare le microonde: nel forno a microonde sono usate come portatori di energia, nel radar come portatore di dati.

L'onda d'urto causata da un'esplosione è un esempio di onda sonora usata come portatore di energia. Siamo però più abituati a usare il suono come portatore di dati.

Addirittura il giornale, che acquistiamo come portatore di dati, finisce spesso come portatore di energia, quando lo si usa per accendere il fuoco.

Esercizi

1. Disegna tre diversi diagrammi di flusso per i dati, con sorgente e ricevitore. (Scegli esempi diversi da quelli di fig. 15.4)
2. Cita tre diversi apparecchi che cedono dati con il portatore suono.
3. Cita tre diversi apparecchi che ricevono dati con il portatore luce.
4. Quale portatore viene usato per il trasporto di dati dal telecomando al televisore?
5. In fig. 15.7 mancano i nomi dei portatori all'entrata e all'uscita di entrambi i trasferitori. Completa il diagramma.
6. Inserisci in fig. 15.8 i nomi dei trasferitori di dati.
7. Disegna una catena di trasferitori che ne comprenda almeno quattro. (Scegli un esempio diverso da quello in fig. 15.6.)

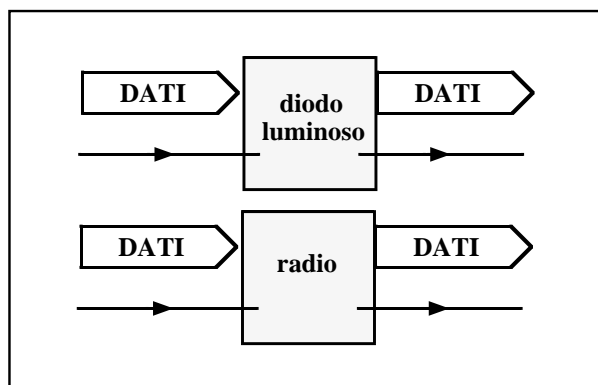


Fig. 15.7. Quali sono i portatori di dati in entrata e in uscita?

15.2 La quantità di dati

A parla con B e C con D. A e B parlano in fretta, C e D lentamente. Quindi, nello stesso lasso di tempo A e B si scambiano più dati di C e D.

Possiamo affermarlo anche se A e B parlano di tutt'altra cosa che C e D, visto che non stiamo confrontando il significato, ma solo la quantità di ciò che viene detto, la *quantità di dati*. In questo caso il confronto era facile, ma spesso il problema è molto più complesso:

- contiene più dati un fax di una pagina o una conversazione telefonica di un minuto?
- la quantità di dati stampata in un'ora da un certo computer è maggiore o minore di quella trasmessa in una conversazione telefonica di un'ora?

Per rispondere a queste domande dobbiamo poter misurare le quantità di dati. Stiamo per conoscerne una misura quantitativa. Abbreviamo questa nuova grandezza, *quantità di dati*, con la lettera *H*. L'unità di misura della quantità di dati è il bit.

Potremo dire quanti bit vengono trasmessi, per esempio in un minuto di telefonata, in un'ora di televisione o in cinque minuti di segnali di fumo.

Come vedremo meglio più avanti, questa misura quantitativa è di grande importanza pratica: trasmettere e immagazzinare dei dati costa soldi, e il prezzo per la trasmissione, rispettivamente per l'immagazzinamento, dipende dalla quantità di dati, cioè dal numero di bit.

Per capire cosa si intende per bit consideriamo un esempio di trasmissione di dati molto semplice.

Willy e Lilly hanno pianificato un giro in bici per domenica prossima. Hanno bisogno del permesso dei loro genitori. Willy l'ha già chiesto e ottenuto, ma i genitori di Lilly torneranno a casa solo sabato sera tardi. A quell'ora Lilly non ha il permesso di uscire di casa e non può usare il telefono per non svegliare la sorellina di Willy. Come può far sapere a Willy, ancora sabato sera, se il giro in bici si farà o no?

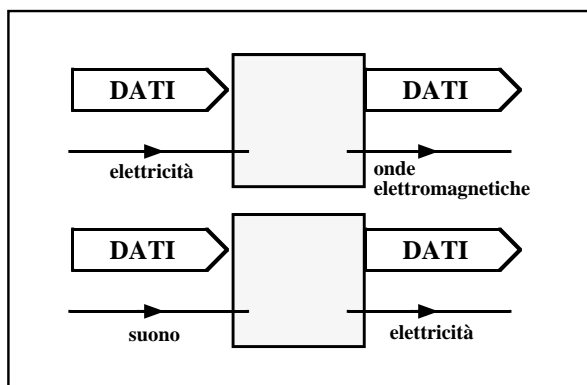


Fig. 15.8. Di quali trasferitori di dati si tratta?

I ragazzi hanno un'idea. Le loro case distano circa 300 m e tra le finestre delle loro camere la visuale è sgombra. Si accordano quindi per comunicare con una torcia che si può regolare sul rosso o sul verde: alle 10 in punto Lilly manderà un segnale luminoso, verde se può andare in gita, rosso se non ha il permesso.

Il metodo per la trasmissione di dati si rivela efficace e Willy e Lilly lo usano anche in altre occasioni. Per esempio la domenica successiva, quando Lilly chiede a Willy di farle sapere il risultato di un incontro di tennis trasmesso in televisione, ma che lei non ha il permesso di guardare.

In questo modo Willy e Lilly possono comunicare nelle occasioni più disparate. A questo punto Bob, che abita in un'altra casa, si accorge che Willy e Lilly si scambiano messaggi. Ma cosa può dire Bob del procedimento? Certamente non può dire quale sia il contenuto dei messaggi trasmessi. Però può dire che ogni messaggio è fatto in modo da rappresentare una scelta tra due possibili messaggi: in effetti vengono usati solo due segni.

La quantità di dati trasmessa ogni volta che Willy e Lilly si comunicano qualcosa è sempre la stessa: equivale a 1 bit.

Ci possiamo anche esprimere così: sorgente di dati e ricevitore di dati si accordano su una domanda che prevede solo "sì" o "no" come risposte, per esempio:

"Puoi venire alla gita in bici?"

"La finale l'ha vinta Tizio?"

Chiamiamo queste domande, *domande sì/no*. Possiamo riassumere:

1 bit è la quantità di dati trasmessa con la risposta a una domanda sì/no.

Ovviamente non è rilevante il segno scelto per rispondere alla domanda. Possiamo semplicemente usare le parole "sì" e "no". Sarebbero altrettanto efficaci un lampo di luce verde e uno di luce rossa, uno blu e uno bianco o uno breve e uno prolungato. Naturalmente il messaggio può essere trasmesso anche elettricamente attraverso un collegamento a doppio conduttore, ad esempio con i segni "corrente accesa" e "corrente spenta".

È importante rendersi conto che la quantità di dati è indipendente dal contenuto della domanda. Sia che la domanda riguardi una piccolezza o qualcosa di estremamente importante - la risposta porta sempre 1 bit.

Torniamo a Willy e Lilly. Il traffico di dati tra i due aumenta e alla fine capita che una sera Willy debba rispondere a parecchie domande sì/no. Di conseguenza decidono che il segnale luminoso per la prima domanda sia spedito alle 22.00, il segnale per la seconda domanda alle 22.05 e quello per la terza

alle 22.10. Visto che con ogni segno viene trasmesso 1 bit, per quella sera il totale è di 3 bit. Ora vedremo come si possono trasmettere anche più bit con un solo segno.

Non tutti i messaggi possono essere ridotti a una domanda sì/no - al contrario: la maggior parte delle domande prevede più di due sole risposte. Anche Willy e Lilly se ne accorgono.

Per due sere successive in televisione c'è un appassionante poliziesco in due puntate. Dopo la prima parte, si sa che una delle seguenti quattro persone ha commesso un omicidio:

la domestica
il postino
la sorella della vittima
il marito della vittima.

Willy e Lilly si sono appassionati e non vedono l'ora di scoprire chi è il colpevole. Purtroppo Lilly viene a sapere che la sera successiva sua zia sarà in visita e il televisore resterà spento. Quindi Willy dovrà comunicarle in qualche modo chi è il colpevole.

Però c'è un problema: la domanda "Chi è il colpevole?" non ha due, bensì quattro risposte possibili. Il problema viene risolto rapidamente. Willy suggerisce il seguente procedimento: deve procurarsi una pellicola colorata di blu in modo che la torcia emetta luce di quattro colori diversi - rosso, verde, blu e bianco - e poi basterà seguire il seguente schema:

domestica:	verde
postino:	rosso
sorella:	bianco
marito:	blu

Un accordo di questo tipo viene detto *codice*. Il procedimento di Willy funzionerebbe di certo, ma Lilly ha un'altra idea: "Possiamo cavarcela anche con due colori. Tu però devi trasmettere due segni consecutivi. Con il primo dici se si tratta di un uomo o di una donna e con il secondo se il colpevole era parente della vittima o no." Il codice di Lilly è quindi:

domestica:	verde - verde
postino:	rosso - verde
sorella:	verde - rosso
marito:	rosso - rosso

Un codice del genere, dove vengono utilizzati solo due diversi segni, viene detto *codice binario*.

Willy e Lilly stanno per scoprire una proprietà importante della tecnica dei dati. In seguito formuleremo il teorema in forma generale. Per ora rappresentiamo graficamente il metodo di Lilly, disegnando uno schema ad albero per le decisioni, fig. 15.9.

La domanda "Chi è il colpevole?", che ha quattro possibili risposte, viene ridotta a due domande ognuna con due risposte, cioè a due domande sì/no. Ogni risposta a una domanda sì/no porta 1 bit. Quindi in totale viene trasmessa una quantità di dati $H = 2$ bit.

Però abbiamo visto che il messaggio, chi è il colpevole, può essere trasmesso con un solo segno se invece di due colori ne abbiamo a disposizione quattro. Di conseguenza:

Una sorgente che dispone di quattro segni diversi, trasmette al ricevitore una quantità di dati $H = 2$ bit con ogni segno emesso.

I nostri ragionamenti mostrano che la quantità di dati trasmessa dipende dal numero di segni a disposizione della sorgente. Se il numero di segni è 2, cioè con un codice binario, con ogni segno viene emesso 1 bit, se il numero di segni è 4 diventano 2 bit per segno.

Ora non è più difficile scoprire quanti bit per segno vengono trasportati quando nella trasmissione si utilizza un numero ancora maggiore di segni diversi: facciamo semplicemente una codifica binaria, cioè scomponiamo la trasmissione in una serie di trasmissioni sì/no consecutive.

La fig. 15.10 mostra come una risposta scelta tra 8 possibilità venga trasmessa anche con 3 risposte a domande sì/no. Infatti ci sono 8 possibili sequenze di segnali verdi e rossi, e ogni risposta corrisponde a una di queste sequenze. Quindi in totale si trasmettono 3 bit.

Se abbiamo a disposizione 8 segni diversi, possiamo trasmettere i 3 bit con un solo segno.

Già si capisce come generalizzare la regola: se la sorgente dispone di 16 segni diversi, ogni segno trasmesso porta 4 bit, se il numero di segni è 32 vengono trasmessi 5 bit per segno e così via.

Se il numero di segni è pari a 2^n , con ogni segno vengono trasmessi n bit.

Se il numero di segni è una potenza di due, è molto facile dire quanti bit vengono trasmessi con ogni segno. Anche se il numero di segni non è una potenza di due è possibile calcolare il numero di bit - ma solo con l'aiuto di strumenti matematici che saranno trattati più avanti nel corso. Però già ora siamo in grado di fare una stima.

Ipotizziamo che il numero di segni sia 25. Questo numero si trova tra le potenze di due $16 = 2^4$ e $32 = 2^5$. Di conseguenza, in questo caso con un segno vengono trasmessi tra 4 e 5 bit.

Se conosciamo il numero di segni, grazie alla tabella 15.3 possiamo approssimare il numero di bit. Per fare la tabella basta una qualunque calcolatrice.

Da una qualsiasi potenza di due, si ottiene la successiva moltiplicando per 2. Quindi:

$$2 \cdot 2^3 = 2^4 \text{ oppure}$$

$$2 \cdot 8 = 16.$$

Inversamente, per ottenere la precedente si divide per 2:

$$2^4 : 2 = 2^3 \text{ oppure}$$

$$16 : 2 = 8.$$

Calcoliamo ora la potenza che precede 2^1 :

$$2^1 : 2 = 2^0 \text{ oppure}$$

$$2 : 2 = 1.$$

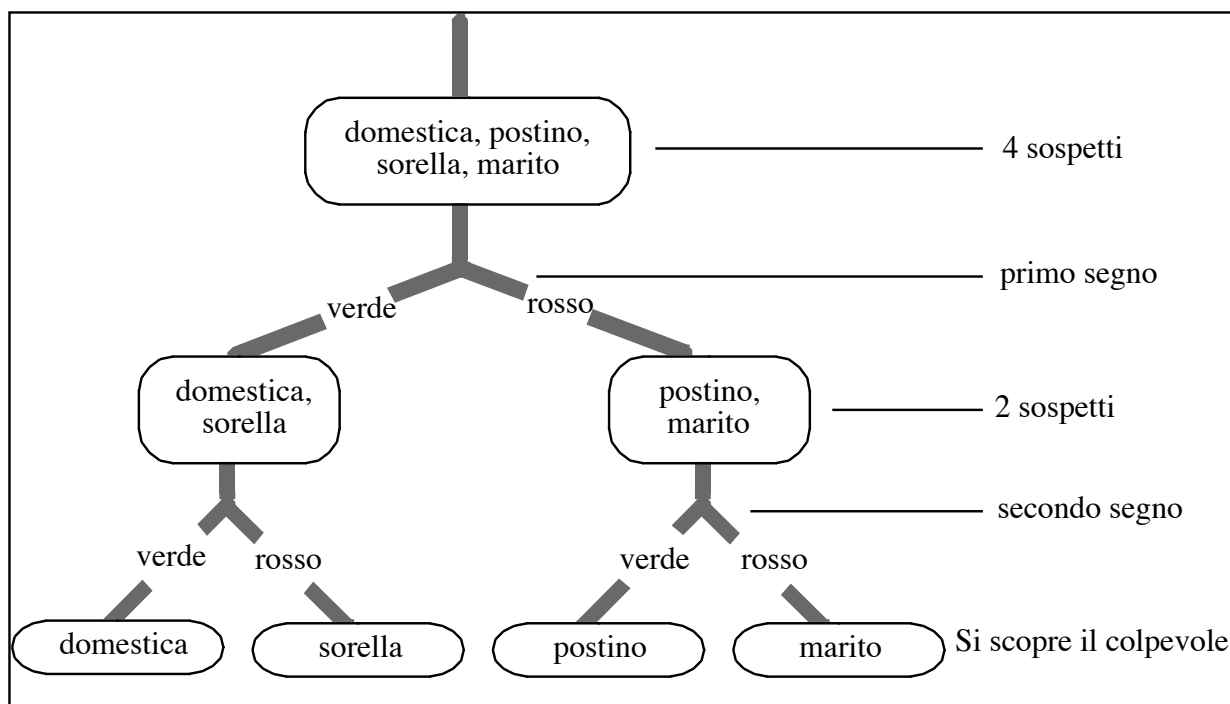


Fig. 15.9. Lo schema ad albero dimostra come la ricerca dell'assassino possa essere ridotta a due domande sì/no.

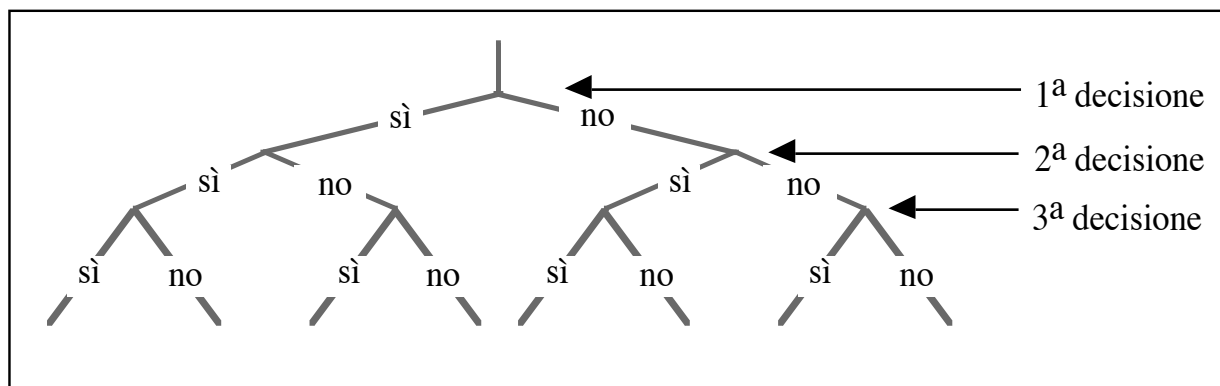


Fig. 15.10. Schema ad albero con tre domande sì/no consecutive.

Quindi è possibile anche elevare a zero un numero. Qualsiasi numero elevato a zero dà 1 (l'unica eccezione è lo zero stesso, l'espressione 0^0 non è definita). In particolare anche $2^0 = 1$. Ora possiamo completare la tabella 15.3. Se il numero di segni a disposizione è 1, con ogni segno vengono trasmessi 0 bit. Sorprendente? A dire la verità, no. Se Willy e Lilly stabiliscono che questa sera alle 22:00 Willy manderà un determinato segnale, quando Lilly riceve il segnale non scopre niente di nuovo.

E nella situazione seguente? Willy dice a Lilly che alle 22 le manderà un lampo di luce bianca se il Bayern avrà vinto una certa partita di calcio. Se non la vince non manderà nessun segnale. In questo caso viene indiscutibilmente trasmesso un messaggio, ma apparentemente utilizzando un solo segno. Invece anche in questo caso i segni sono due. Alle 22 la torcia può essere accesa o spenta. I segni sono quindi "luce" e "buio".

La situazione è simile a quella del campanello della scuola, del campanello di casa, del clacson, della sirena, dei lampeggianti a un passaggio a livello incustodito, ecc. In tutti questi casi ci sono due segni, p.es. "il campanello suona" e "il campanello non suona", oppure "la luce lampeggia" e "la luce non lampeggia".

Trasferire i dati e decodificare i dati sono processi molto simili, tanto che la loro distinzione è abbastanza arbitraria. Consideriamo nuovamente i due codici di Willy e Lilly. È sicuramente possibile

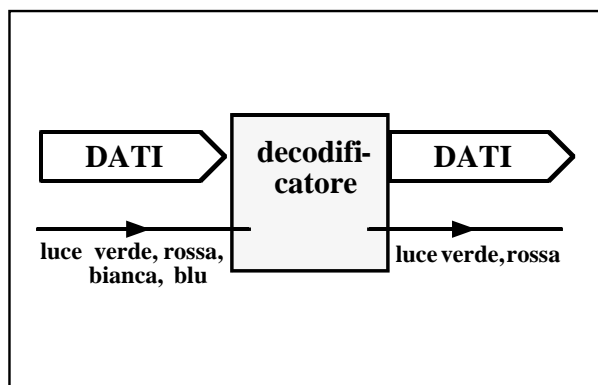


Fig. 15.11. Un decodificatore viene rappresentato con lo stesso simbolo del trasferitore di dati.

ricevere un messaggio con il codice di Willy, cioè con luce di quattro colori, ricodificarlo con il codice di Lilly, cioè con luce di due colori, e rappresentare graficamente questo processo esattamente come un processo di trasferimento, fig. 15.11.

I dati vengono codificati in modo binario in molte applicazioni della moderna tecnica dei dati: i computer lavorano con segni binari, ma anche la calcolatrice, il CD, il DVD e internet.

15.3 Esempi di trasporto di dati

L'alfabeto Morse

La fig. 15.12 mostra come si spedivano i telegrammi una volta. In un impianto del genere, sorgente e ricevitore sono parti di un circuito elettrico. La sorgente è semplicemente un tasto che permette di chiudere il circuito. Quando si chiude il circuito in questo modo, dal ricevitore un elettromagnete preme una matita su un nastro di carta scorrevole. Per la trasmissione di dati veniva usato l'alfabeto Morse, fig. 15.13. Il codice Morse usa quattro segni: il "punto" (= breve chiusura del circuito), la "linea" (=chiusura del circuito più lunga), la "pausa breve" (all'interno di una lettera), la "pausa lunga" (tra due lettere). Visto che il codice ha quattro segni, con ogni segno vengono trasmessi 2 bit. L'alfabeto Morse è ancora usato in navigazione e da alcuni radioamatori.

Tabella 15.3

Numero di segni bit/segno		Numero di segni bit/segno	
2	1	4 096	12
4	2	8 192	13
8	3	16 384	14
16	4	32 768	15
32	5	65 536	16
64	6	131 072	17
128	7	262 144	18
256	8	524 288	19
512	9	1 048 576	20
1 024	10	2 097 152	21
2 048	11	4 194 304	22

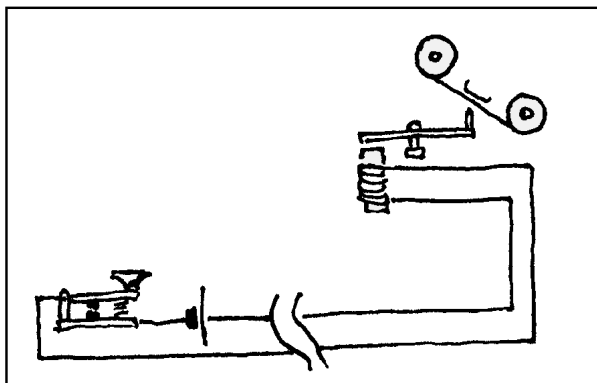


Fig. 15.12. Trasmissione Morse.

a .---	l ----	w ---	: -----
b ----	m ----	x ----	1 .-----
c .-.-.	n -.-	y -.-.-	2 ..-----
d -.-	o -----	z -----	3 ---
e .	p -----	ä .-.-	4 .-----
f .-.-.	q -.-.-.-	ö .-.-.-	5 .-----
g -----	r .-.-	ü .-.-	6 -----
h .-.-.	s .-.-	ch -----	7 -----
i ..	t -.-	punto .-.-.-	8 -----
j .-.-.-	u .-.-	virgola .-.-.-	9 -----
k -.-.-	v .-.-.-	? .-.-.-	0 -----

Fig.15.13. L'alfabeto Morse.

La scrittura

Uno dei metodi più importanti per trasportare e immagazzinare dati è la scrittura. Quanti bit contiene un carattere? Prima dobbiamo stabilire quanti caratteri diversi ci sono: lettere maiuscole e minuscole, cifre, segni di punteggiatura, segni di calcolo e altri segni speciali. Ovviamente anche lo spazio tra due lettere rappresenta un segno. Immaginiamo di poter usare solo quei segni che si trovano sulla tastiera di una macchina da scrivere. La tastiera di una comune macchina da scrivere ha circa 45 tasti. Ogni tasto ha una doppia funzione, vuol dire che a dipendenza del fatto che il tasto "maiuscolo" sia premuto o meno, viene scritto un segno diverso. Per le lettere si tratta del maiuscolo e del minuscolo. In totale una macchina da scrivere può usare circa 90 segni, cioè tra 2^6 e 2^7 segni. Ogni segno porta quindi poco meno di 7 bit.

Immagini

Un computer genera un'immagine sullo schermo. Quale quantità di dati ha spedito allo schermo per poterlo fare? Lo schermo di un computer è composto in genere da $1600 \cdot 1200 = 1\,920\,000$ punti, i cosiddetti pixel. Cominciamo supponendo che sia uno schermo in bianco e nero. Ogni punto dell'immagine può essere bianco o nero. Il computer deve quindi spedire 1 bit per ogni pixel, per tutto lo schermo fanno circa 2 Mbit. Di solito gli schermi producono immagini a colori, dove ogni punto può avere uno tra $16\,777\,216$ colori diversi. Visto che $16\,777\,216 = 2^{24}$, per ogni pixel il computer deve spedire 24 bit, che per tutta l'immagine fanno un totale di

$$24 \cdot 2 \text{ Mbit} \approx 50 \text{ Mbit.}$$

La quantità di dati di un'immagine televisiva è di circa 50 Mbit.

La quantità di dati di un valore misurato

Quando qualcuno compie una misurazione ottiene dei dati sull'oggetto sul quale la misurazione viene

effettuata. Una bilancia a piatti abbia un carico massimo di 5 kg. Il peso più leggero contenuto nella pesiera sia di 1 g. Alla domanda "Quanto pesa l'oggetto?" la bilancia può dare 5000 risposte diverse. Il numero di segni è quindi 5000 e la quantità di dati ricevuta con la risposta circa 12 bit. Una moderna bilancia analitica fornisce fino a 20 bit per pesata.

Per calcolare la quantità di dati ottenuta dalla lettura di una scala *analogica*, p.es. la scala del termometro quando ci si misura la febbre, si deve innanzitutto essere in chiaro su quali valori è possibile distinguere sulla scala. La precisione di lettura di un termometro che serve a misurare la febbre è $1/10^\circ\text{C}$. Visto che riporta le temperature dai 35 ai 42°C , il numero di segni risultante è 70. Quando qualcuno legge la temperatura riceve quindi circa 6 bit.

Esercizi

1. In tutta la Germania ci sono circa 5000 diversi codici di avviamento postale (CAP). Qual è la quantità di dati portata da un codice di avviamento postale?
2. La quantità di dati portata da un numero di telefono dipende dal tipo di telefonata: locale, nazionale o internazionale. Stima la quantità di dati di un numero di telefono di una rete locale con circa 10 000 allacciamenti.
3. La scrittura cinese è composta da molti caratteri. Di solito se ne usano circa 2000. Quanti bit porta un carattere, se ci basiamo su questa cifra?
4. Una sorgente emette 5 bit con ciascun segno. Quanti segni ha a disposizione la sorgente?
5. Il numero di segni di una sorgente è 3. Disegna un albero di decisioni per questa sorgente. (Deve contenere tre decisioni consecutive). Stima la quantità di dati ottenuta da chi riceve tre segni in successione emessi da questa sorgente.
6. Il numero di segni della sorgente A è una potenza di due. La sorgente B ha un numero di segni esattamente doppio. Cosa ne consegue per le quantità di dati per segno emesso dalle due sorgenti?

7. Una magia con le carte:

Prendiamo da un mazzo 16 carte qualsiasi. Il mago fa scegliere una carta a uno spettatore. Lo spettatore guarda la carta in modo che il mago non la possa vedere. La carta è rimessa nel mazzo che poi viene mescolato. Il mago scopre ora le carte una ad una, separandole in quattro mazzetti: una carta sul primo, poi una sul secondo, una sul terzo, una sul quarto, poi di nuovo sul primo e così via fino a che tutte e 16 le carte sono sul tavolo. Lo spettatore deve dire in quale mazzetto si trova la sua carta. Il mago rimette i mazzetti l'uno sopra l'altro e poi fa nuovamente quattro mazzetti sul tavolo, come prima. Lo spettatore dice di nuovo in quale mazzetto si trova la sua carta. Ora il mago sa qual è la carta estratta dallo spettatore: riprende tutte le carte e le gira una ad una fino a trovare quella giusta.

Che quantità di dati deve ottenere il mago per identificare una carta tra 16? Quanti bit riceve ogni volta che lo spettatore indica il mazzetto che contiene la sua carta? Qual è il trucco?

15.4 L'intensità della corrente di dati

Ogni volta che qualcosa scorre - che si tratti di acqua, automobili, persone, energia, elettricità o qualsiasi altra cosa, sostanza o grandezza fisica - ci si può interrogare sull'intensità della corrente. Come sappiamo, l'intensità di una corrente si ottiene dividendo la quantità che in un determinato tempo scorre in un qualsiasi punto della corrente, per il tempo impiegato da quella quantità per scorrere in quel punto:

Intensità della corrente di dati = quantità di dati divisa per intervallo di tempo

o in simboli

$$I_H = \frac{H}{t}$$

L'unità di misura dell'intensità della corrente di dati I_H è il bit/s. Più sono i bit trasmessi in un secondo, maggiore è l'intensità della corrente di dati.

L'intensità della corrente di dati è una grandezza estremamente utile. Permette di confrontare le prestazioni di diversi dispositivi per la trasmissione di dati. Consideriamo alcuni esempi di trasmissione di dati.

Telefono e radio

Quando telefoniamo la corrente di dati è circa 50 kbit/s. La qualità della trasmissione di dati acustici per telefono non è molto alta. Una trasmissione migliore richiede una corrente di dati più intensa. Per questo motivo l'intensità della corrente di dati in un CD audio è molto maggiore: circa 1000 kbit/s.

Televisione

Nel paragrafo 15.3 abbiamo calcolato la quantità di dati di una singola immagine televisiva, ottenendo $H = 50$ Mbit. Un programma televisivo viene trasmesso a circa 20 immagini al secondo. In questo modo si crea l'illusione di un movimento fluido degli oggetti sullo schermo. Da questi valori otteniamo l'intensità della corrente di dati che fluisce dall'emittente televisiva all'apparecchio ricevente:

$$\begin{aligned} 50 \text{ Mbit/immagine} \cdot 20 \text{ immagini/secondo} \\ = 1000 \text{ Mbit/secondo.} \end{aligned}$$

Annotiamo che:

La corrente di dati per la percezione visiva è di circa 1000 Mbit/s. Per quella acustica la corrente di dati è di circa 1000 kbit/s.

Internet

Quando scarichiamo dati da internet l'intensità media della corrente di dati appare sullo schermo. Dipende dal carico della rete in quel momento e da dove si trova il server dal quale scarichiamo i dati. È notoriamente molto variabile.

La sonda Voyager 2

Il 24.01.1986, dopo aver percorso circa 3 miliardi di chilometri in un viaggio di più di nove anni, la sonda spaziale Voyager 2 raggiunge il pianeta Urano. La macchina fotografica a bordo della Voyager 2 ha scattato circa 6000 fotografie di Urano. Queste immagini sono state spedite a Terra con onde elettromagnetiche, esattamente come si fa per la televisione. L'intensità della corrente di dati era però di soli 20 kbit/s. Vogliamo calcolare quanto è durata l'emissione di dati da parte della Voyager 2.

Da

$$I_H = H/t$$

segue

$$t = H/I_H.$$

Per un'immagine ci vogliono circa 4 Mbit. Per 6000 immagini otteniamo quindi:

$$\begin{aligned} H = 6000 \cdot 4 \text{ Mbit} &= 24\,000 \text{ Mbit} \\ &= 24\,000\,000 \text{ kbit.} \end{aligned}$$

Da

$$I_H = 20 \text{ kbit/s segue quindi}$$

$$t = (24\,000\,000/20) \text{ s} = 1\,200\,000 \text{ s} \approx 14 \text{ giorni.}$$

Quindi, Voyager 2 ha dovuto emettere durante due settimane per poter trasmettere tutte le immagini. Il tempo impiegato dai dati per raggiungere la Terra da Urano, era di circa 3 ore.

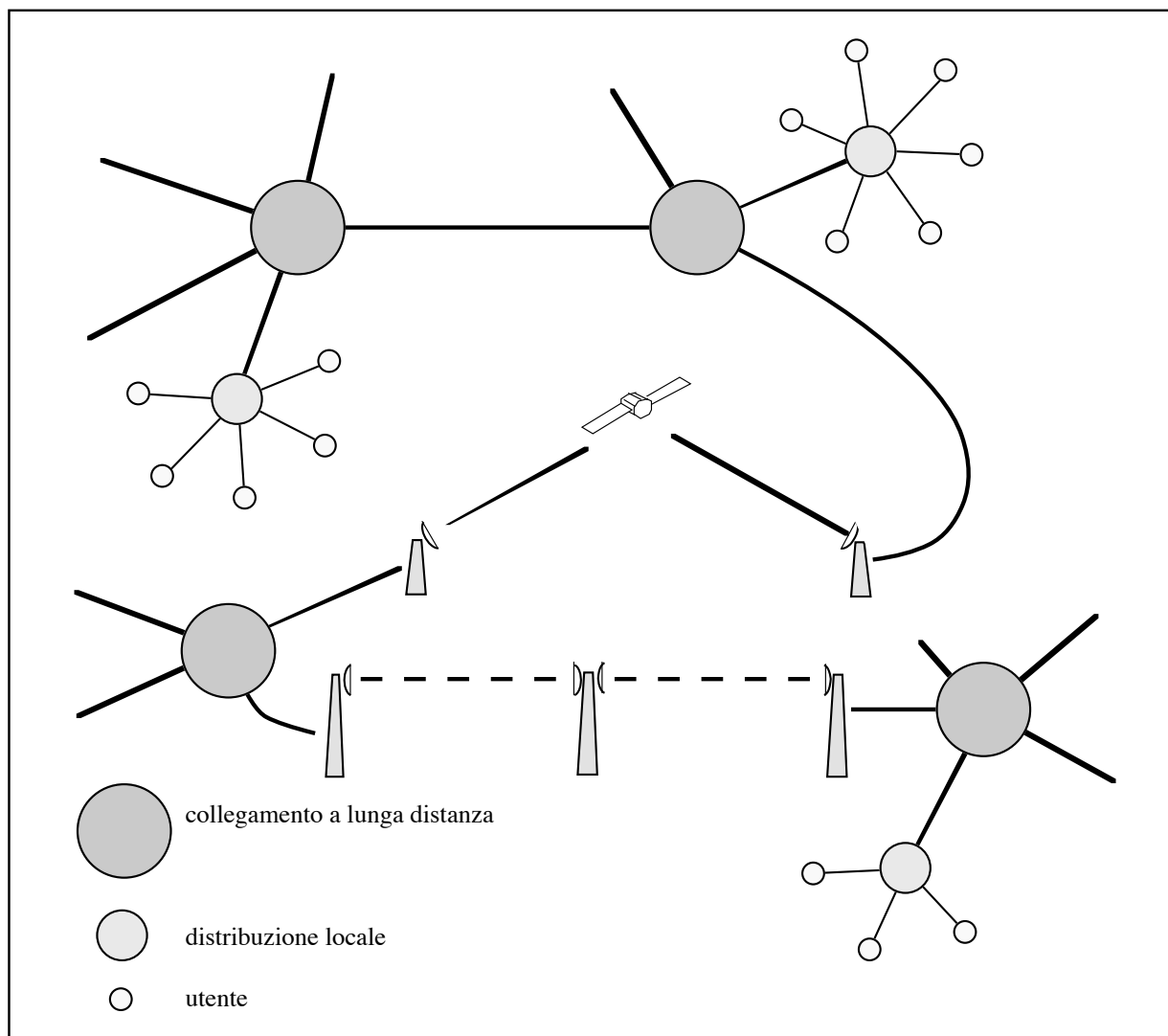


Fig. 15.14. Rappresentazione semplificata di una rete telefonica

Esercizi

1. Un segno impresso da una macchina per scrivere porta circa 7 bit. Qual è l'intensità della corrente di dati tra la tastiera e la stampante se scriviamo a una velocità di 180 battute al minuto.
2. Con il Teletex (telescrivente da ufficio) si possono trasmettere dei testi scritti a macchina. L'intensità della corrente di dati è di 2400 bit/s. Quanto dura la ricezione di un testo da una pagina DIN A4? (Considera 40 righe per pagina, 70 caratteri per riga e 7 bit per carattere.)

15.5. Contenitori di dati

Capita spesso di voler conservare delle immagini, un testo, della musica o dei numeri. In linea di massima il problema è sempre lo stesso: dobbiamo immagazzinare dei dati. Si può fare nei modi più disparati, esistono molti tipi di *contenitore di dati*, tabella 15.4.

Il processo di riempimento di un contenitore di dati si dice *registrazione*, l'estrazione dei dati *riproduzione*. In alcuni casi questi stessi processi vengono detti "scrivere" e "leggere". Per la registrazione e la riproduzione, cioè per scrivere e leggere, ci vogliono delle speciali apparecchiature. A volte i dispositivi di scrittura e lettura sono riuniti in un solo apparecchio, tabella 15.5.

Alcuni contenitori non necessitano nemmeno di un apparecchio di lettura: libri, fotografie, ecc. In questo caso è sufficiente illuminare il contenitore.

Possiamo anche classificare i contenitori di dati secondo un altro criterio, cioè in contenitori a lettura-scrittura e contenitori a sola lettura. Il contenuto dei contenitori a lettura-scrittura può essere cancellato in modo da permettere un riutilizzo del contenitore. Ne fanno parte la maggior parte dei contenitori magnetici (il nastro video, il nastro audio, il dischetto di computer), alcuni contenitori elettronici nei computer e naturalmente anche la lavagna. I contenitori a sola lettura (in inglese *read-only-memory* o ROM) possono essere caricati di dati una sola volta.

Tabella 15.4

Videocassetta e cassetta audio
Pellicola per macchina fotografica o cinepresa
Diapositiva
Lucido per lavagna luminosa
Disco in vinile
Compact Disc
Lastra fotografica
Libro, giornale
Blocco per appunti
Lavagna
Banconote
Banda perforata per telescrivente
Schede perforate per computer
Nastri perforati per pianole
Cilindro di un carillon
Dischetto per computer
Memoria elettronica di un computer o di una calcolatrice
Cervello umano e cervello animale in genere

Di solito viene fatto direttamente dal fabbricante. Esempi di contenitori a sola lettura sono la pellicola per una macchina fotografica, il CD, il DVD, un foglio scritto con inchiostro indelebile, il libro e il giornale, le schede e i nastri perforati, le ROM elettroniche all'interno di un computer.

Vogliamo approssimare la quantità di dati immagazzinata in alcuni contenitori di dati.

Contenitore di dati: libro

Consideriamo un libro di dimensioni medie, con 200 pagine e 4000 caratteri per pagina. Quindi, in totale il libro contiene 800 000 caratteri. Secondo la stima fatta nel paragrafo 15.3, la quantità di dati portata da un carattere è circa 7 bit. Il nostro libro contiene di conseguenza $800\,000 \cdot 7 \text{ bit} = 5,6 \text{ Mbit}$.

Contenitore di dati: CD

Come visto nel paragrafo 15.4, l'intensità della corrente di dati associata ai messaggi acustici è di circa 1000 kbit/s. Un CD della durata di 1 ora = 3600 secondi, contiene quindi

$$1000 \text{ kbit/s} \cdot 3600 \text{ s} = 3600 \text{ Mbit.}$$

Contenitore di dati: videocassetta e film

In televisione vengono trasmessi 1000 Mbit/s. Quindi, una videocassetta della durata di 1 ora porta $1000 \text{ Mbit/s} \cdot 3600 \text{ s} = 3\,600\,000 \text{ Mbit}$. La quantità di dati immagazzinata in un film della durata di 1 ora è dello stesso ordine di grandezza.

Contenitore di dati: cervello

Il funzionamento del cervello umano e di quello degli animali è lungi dall'essere spiegato. Possiamo farci solo un'idea molto approssimativa della sua capacità di immagazzinare dati. Si stima che nel cervello umano ci sia posto per una quantità di dati di circa 10^{12} bit.

Contenitori di dati in un computer

La memoria di un computer deve avere da un lato una grande capacità di immagazzinare dati, cioè una grande capienza. Ma dall'altro deve anche permettere un accesso rapido ai dati. Queste due esigenze sono spesso in contrapposizione: contenitori con una grande capacità hanno un tempo di accesso lungo e i contenitori con un accesso in tempi brevi non possono contenere molti dati. Per questo motivo i computer hanno entrambi i tipi di memoria. La *memoria di lavoro (RAM)*, con un tempo di accesso ridotto, lavora elettronicamente. La *memoria di massa*, che si trova spesso all'esterno del computer, di solito lavora magneticamente, come il nastro audio o quello video.

Nei computer i dati vengono immagazzinati a gruppi di 8 bit. Uno di questi gruppi di segni viene detto Byte (leggi "bait"). Di solito la capacità di memoria di un computer è espressa in Byte. La memoria di lavoro di un computer è tipicamente di 256 MByte (= 2048 Mbit). Su un dischetto tradizionale c'è spazio per circa 1,4 MByte (= 11,2 Mbit), su un CD-ROM 650 MB (= 5200 Mbit).

Tabella 15.5

Contenitore di dati	Apparecchio di scrittura	Apparecchio di lettura
pellicola diapositiva schede perforate	cinepresa macchina fotografica perforatore automatico	proiettore cinematografico proiettore per diapositive lettore di schede perforate
Contenitore di dati	Apparecchio di registrazione e riproduzione (di scrittura e di lettura)	
videocassetta cassetta audio CD-ROM per computer	videoregistratore registratore lettore/scrittore per CD-ROM	

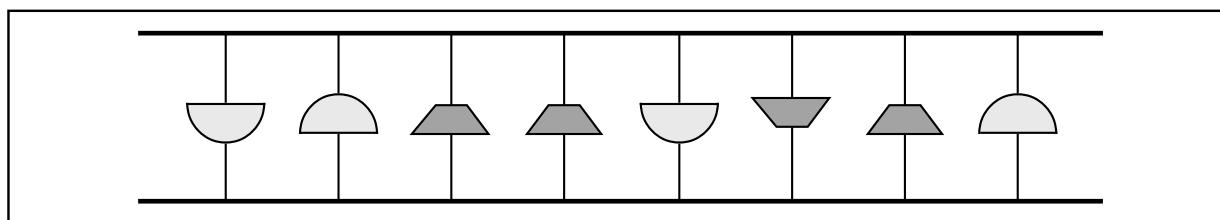


Fig. 15.15. Rappresentazione schematica della struttura del DNA (acido desossiribonucleico)

Contenitore di dati: DNA

Un essere vivente è il risultato dell'interazione tra molte reazioni chimiche. Responsabile del corretto svolgimento di queste reazioni è una specie di piano di organizzazione posseduto da ogni essere vivente. Questo piano di lavoro è costituito da alcune enormi molecole, le molecole di acido desossiribonucleico, o molecole di DNA. Ogni essere vivente ne possiede molti esemplari, sono nel nucleo di ogni cellula.

La struttura del DNA è facile da descrivere (fig. 15.15): tra due lunghissime strisce simili tra loro si trovano, come i pioli di una scala, dei gruppi di atomi. Ci sono due tipi di gruppi, e ogni tipo può essere inserito nella struttura in due modi diversi. In questo modo otteniamo quattro diversi "segni" con i quali il piano di lavoro biologico è codificato. Visto che il numero di segni è 4, ogni segno porta 2 bit.

Uno degli obiettivi importanti della ricerca biologica è capire in che modo il piano di lavoro degli esseri viventi è codificato nelle molecole di DNA.

La lunghezza di queste scale molecolari è enorme se paragonata alla loro larghezza: mentre il diametro è di circa un nanometro, in un batterio la lunghezza è di circa 1 millimetro, quindi un milione di volte in più. Grosso modo lo stesso rapporto tra lunghezza e larghezza di un filo da cucire lungo 100 m. Affinché la molecola di DNA trovi posto nel nucleo di una cellula, viene arrotolata come in un gomitolo.

Gli essere viventi con un organismo più complesso hanno delle molecole di DNA più lunghe. Negli organismi più sviluppati, i dati sono distribuiti su diversi gomitoli di DNA. Nell'uomo per esempio sono 46; ciò corrisponde a una lunghezza totale della scala di DNA di 99 cm. Il numero dei pioli di un batterio è circa 4 milioni e nell'uomo 2,9 miliardi. Il piano di lavoro del batterio ha quindi 8 Mbit, quello dell'uomo circa 6000 Mbit.

Esercizi

1. Quali tra i contenitori di dati in tabella 15.4 vengono utilizzati come contenitori di lettura/scrittura e quali come contenitori di sola lettura?
2. C'è un gioco che consiste nel posare dei dischetti di plastica colorata su una griglia in modo tale da ricoprirla completamente. Così si possono comporre delle immagini fatte da punti colorati.

Immaginiamo che la griglia di 30 cm x 40 cm abbia un reticolo di 60 · 80 punti (questo vuol dire che ogni dischetto colorato misura 0,5 cm di diametro) e che ci siano dischetti di 16 colori diversi. Qual è la quantità di dati di ogni dischetto? Qual è la quantità di dati totale di un'immagine?

3. Un carillon contiene 18 lamelle, ognuna delle quali può produrre un suono diverso. A ogni rotazione del cilindro, ogni lamella può essere pizzicata un massimo di 20 volte. Quanti bit sono immagazzinati sul cilindro?

E l e t t r i c i t à

16. Elettricità e correnti elettriche

Così come la meccanica si occupa di quantità di moto e della sua trasmissione e la termologia di calore e dei trasferimenti di calore, l'elettrologia si occupa di elettricità e delle correnti di elettricità.

Cosa intendiamo per elettricità? A questa domanda diamo per ora una risposta approssimativa e provvisoria. Cos'è l'elettricità lo capirai meglio man mano che ti addenterai nei prossimi capitoli. Per ora possiamo rispondere più o meno così: elettricità è ciò che "scorre" nei fili di un cavo di un apparecchio elettrico - se l'apparecchio è acceso. Ci possiamo immaginare l'elettricità come un qualcosa che si trova da qualche parte e che da un punto può raggiungerne un altro - così come possiamo fare per quantità di moto e entropia.

Solitamente di un corpo si può dire se ha quantità di moto o no: lo vediamo dal fatto che si muova o meno. Di un corpo possiamo anche "vedere" se ha entropia: lo deduciamo dalla sua temperatura. Invece non abbiamo nessun organo di senso predisposto a percepire il contenuto di elettricità di un oggetto. Percepriamo l'elettricità quando prendiamo la scossa, ma ovviamente vogliamo evitarlo perché è pericoloso.

Sai che l'elettricità ha un ruolo importante nella tecnica. Nei prossimi capitoli scoprirai il funzionamento di alcune apparecchiature tecniche.

Si possono suddividere le applicazioni tecniche dell'elettricità in due grandi categorie.

Una classe di applicazioni ha a che fare con la possibilità data dall'elettricità di trasmettere e immagazzinare energia. Infatti l'elettricità è un portatore di energia molto pratico. Di conseguenza, molti apparecchi elettrici servono a trasferire l'energia dall'elettricità a un altro portatore o da un altro portatore all'elettricità. Alcuni esempi sono il motore elettrico, il generatore e tutti gli apparecchi di riscaldamento elettrici.

Nella seconda classe di applicazioni l'elettricità viene utilizzata per la trasmissione, l'immagazzinamento e l'elaborazione di *dati*: di musica, di testi scritti e parlati, di immagini, numeri e altri segni. Questo campo della tecnica è detto elettronica.

A prima vista sembrerebbe che in natura l'elettricità non rivesta una grande importanza. L'unica manifestazione elettrica che tutti conoscono è il lampo. Ma l'apparenza inganna. In realtà la struttura del mondo

microscopico, del mondo degli atomi e delle molecole, è in gran parte determinata dall'elettricità. Gli atomi devono all'elettricità la loro struttura interna ed è l'elettricità che rende possibili i legami tra atomi. Di queste cose si occupa la fisica atomica.

16.1 Il circuito elettrico

La fig. 16.1 mostra una lampadina collegata a un interruttore e a una batteria. Una pila tascabile è fatta allo stesso modo. Dalla batteria, con il portatore elettricità, l'energia arriva alla lampadina. Lì viene trasferita al portatore luce. L'energia viene dalla batteria, arriva alla lampadina e esce dalla lampadina con la luce. Così facendo la batteria lentamente si svuota, cioè il contenuto di energia diminuisce.

Il portatore dell'energia, l'elettricità, prende un'altra strada: l'elettricità scorre "in circolo". Esce dalla batteria da uno dei collegamenti, il polo positivo, scorre in un filo fino alla lampadina, poi attraverso il filamento e continua nel secondo filo, attraverso l'interruttore, fino al polo negativo della batteria e, attraverso la batteria, torna al polo positivo. Visto che l'elettricità si muove lungo un percorso chiuso e che non si accumula da nessuna parte, un dispositivo del genere viene detto *circuito elettrico*. La corrente di elettricità è detta più semplicemente *corrente elettrica*.

L'elettricità non può scorrere in tutti i materiali. Sostanze nelle quali scorre bene sono dette *conduttori* elettrici. Sostanze nelle quali non può scorrere sono dette *isolanti* elettrici. I metalli fanno parte dei

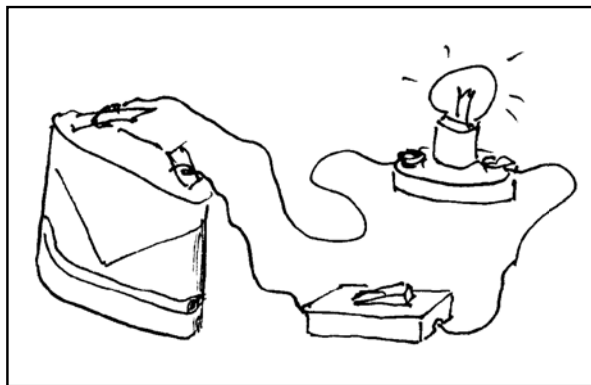


Fig. 16.1. Circuito di una pila tascabile

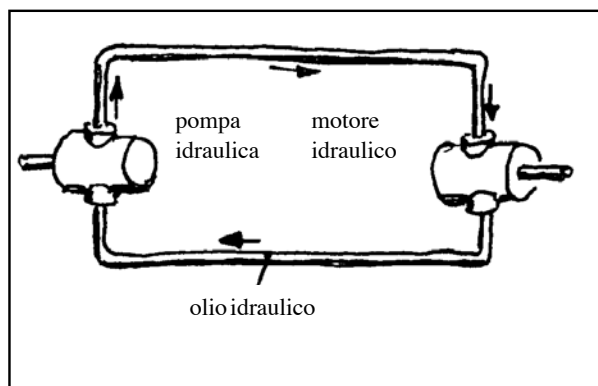


Fig. 16.2. Il circuito idraulico ha molte similitudini con un circuito elettrico

conduttori. Negli isolanti troviamo aria, vetro e la maggior parte delle materie plastiche.

L'elettricità è una grandezza fisica. Il simbolo per questa grandezza è Q . Viene misurata in coulomb, abbreviato in C.

Un circuito elettrico è molto simile a un circuito idraulico, come quello usato in una scavatrice, fig. 16.2. Anche in questo caso il portatore di energia, l'olio idraulico, scorre in un circuito chiuso. I diagrammi di flusso, figg. 16.3 e 16.4, evidenziano le similitudini.

Così come in un circuito idraulico è la pompa a far sì che il liquido scorra, nel nostro circuito elettrico è la batteria la causa del fluire dell'elettricità. Quindi possiamo immaginare la batteria come una specie di *pompa di elettricità*.

Ci sono altre sorgenti che cedono energia con il portatore elettricità, cioè altre pompe di elettricità. Una è la dinamo di bicicletta. Un apparecchio fondamentale identico si trova in ogni automobile con il nome di alternatore. Dinamo molto grandi, come quelle che si trovano nelle centrali elettriche, si chiamano generatori. Le cellule solari sono un altro esempio di pompa di elettricità. Mentre la dinamo riceve la sua energia con il portatore quantità di moto angolare, la cellula solare riceve la sua con la luce.

Batteria, dinamo e cellula solare sono pompe di elettricità.

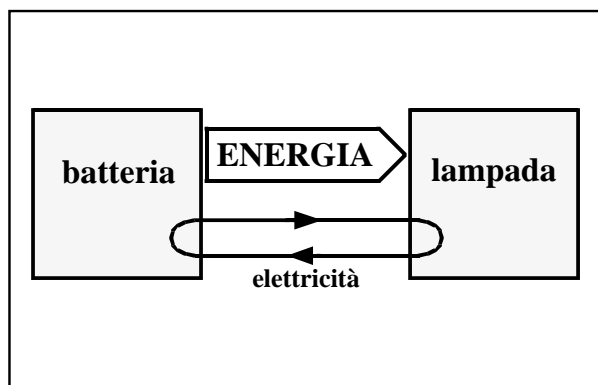


Fig. 16.3. Diagramma di flusso corrispondente al circuito elettrico in fig. 16.1.

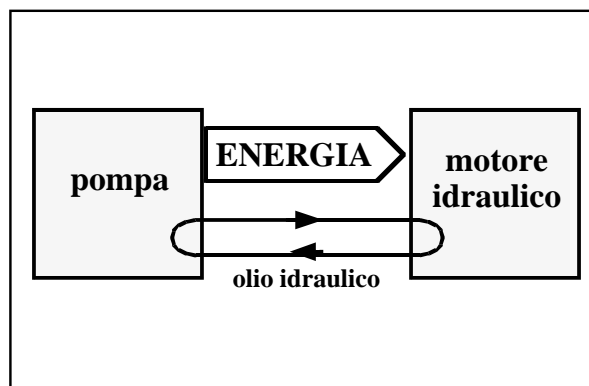


Fig. 16.4. Diagramma di flusso corrispondente al circuito idraulico in fig. 16.2

Il circuito di fig. 16.1 è inizialmente interrotto. Chiudiamo l'interruttore, scorre elettricità nella lampadina. Da dove viene questa elettricità? Dalla batteria, potremmo pensare, come l'energia. Invece non è così. Così come una pompa idraulica può cedere in uscita solo tanta acqua quanta ne ha ricevuta in entrata, una pompa di elettricità può cedere in uscita, cioè al polo positivo, solo tanta elettricità quanta ne ha ricevuta al polo negativo. Ma allora da dove viene l'elettricità?

È contenuta sin dall'inizio nei componenti del circuito: nella batteria, nella lampadina e nei fili. Ma questa elettricità non è stata messa lì dal fabbricante, c'è già di natura. Ogni pezzo di filo, ogni pezzo di metallo, contiene elettricità che comincia a scorrere appena il pezzo di filo o di metallo viene inserito in un circuito.

Quindi, se costruiamo un circuito non ci dobbiamo preoccupare di riempirlo di elettricità. È come se costruiamo dei circuiti idraulici con delle pompe, dei tubi e dei motori già riempiti di olio idraulico. Questi circuiti possono funzionare immediatamente, non devono prima essere riempiti d'olio.

In seguito ci occuperemo molto di circuiti elettrici, anche di quelli complicati. Quindi vale la pena introdurre dei simboli per la loro rappresentazione. La fig. 16.5 mostra i simboli per una batteria, un interruttore aperto, una lampadina e un motore elettrico. Un filo, cioè una conduttura per l'elettricità, è rappresentato semplicemente con una linea dritta. Il

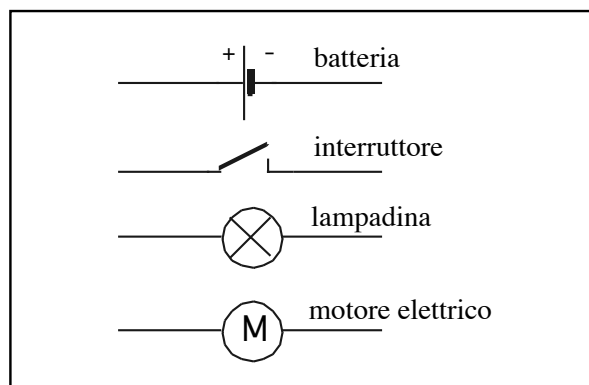


Fig. 16.5. Simboli di alcuni componenti elettrici: batteria, interruttore aperto, lampadina e motore elettrico.

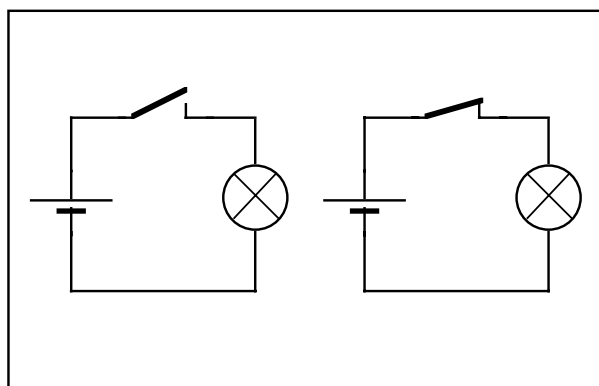


Fig. 16.6. Rappresentazione simbolica del circuito elettrico in fig. 16.1 con l'interruttore in due posizioni diverse.

circuito di fig. 16.1 è rappresentato con i simboli in fig. 16.6, con l'interruttore una volta aperto e una volta chiuso.

La rappresentazione dei collegamenti tra cavi, interruttori, batterie, lampadine, ecc., viene spesso detta *schema elettrico*.

16.2 L'intensità della corrente elettrica

Consideriamo un punto P di un circuito elettrico, fig. 16.7. In un secondo, da questo punto può scorrere molta o poca elettricità, a seconda della batteria e della lampadina utilizzate. Diciamo che *l'intensità della corrente elettrica* può essere grande o piccola. Analogamente alle altre intensità di corrente (p.es. l'intensità della corrente di energia, l'intensità della corrente d'acqua), definiamo:

$$\text{intensità della corrente elettrica} = \frac{\text{quantità di elettricità}}{\text{intervallo di tempo}}$$

L'intensità della corrente elettrica si abbrevia con la lettera *I*. Quindi

$$I = \frac{Q}{t}$$

Come unità di misura dell'intensità della corrente elettrica otteniamo

Tabella 16.1

Nome della grandezza	quantità di elettricità	intensità della corrente elettrica
Abbreviazione	<i>Q</i>	<i>I</i>
Nome dell'unità di misura	coulomb	ampere
Abbreviazione	C	A

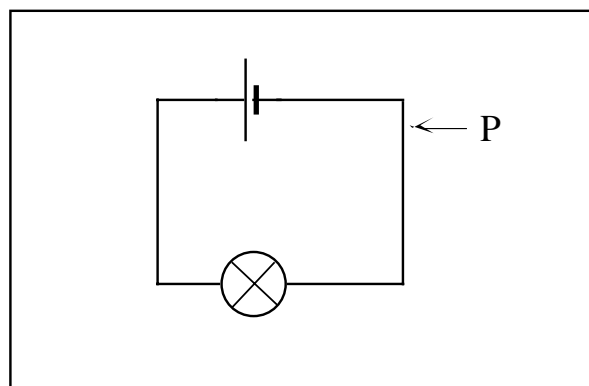


Fig. 16.7. Nel punto P del circuito scorre una determinata quantità di elettricità al secondo.

coulomb/secondo = C/s.

Di solito per questa unità composta si usa un nome più semplice: ampere, abbreviato A. Quindi

ampere = Coulomb/secondo oppure $A = C/s$.

In tabella 16.1 trovate riassunte le nuove grandezze con le loro unità di misura e le rispettive abbreviazioni.

Per farci un'idea di quali siano le correnti forti e quali quelle deboli, facciamo una misurazione. L'apparecchio che misura l'intensità della corrente elettrica si chiama *amperometro*. Un amperometro ha due collegamenti, fig. 16.8. Per misurare l'intensità della corrente nel filo in fig. 16.9a, stacciamo i cavi, fig. 16.9b. Ora abbiamo due estremità, che allacciamo ai due collegamenti dell'amperometro, fig. 16.9c. Adesso l'elettricità deve scorrere attraverso l'amperometro.

Per misurare l'intensità della corrente elettrica in un filo, separiamo il filo e allacciamo le due nuove estremità ai collegamenti dell'amperometro.

La fig. 16.10 mostra un circuito in cui è inserito un amperometro (simbolo per l'amperometro: un cerchio con la lettera A). L'amperometro segna 0,5 A, un valore tipico per una piccola lampadina. Se spostiamo l'amperometro in un altro punto del circuito, fig. 16.11, l'amperometro segna ovvia-

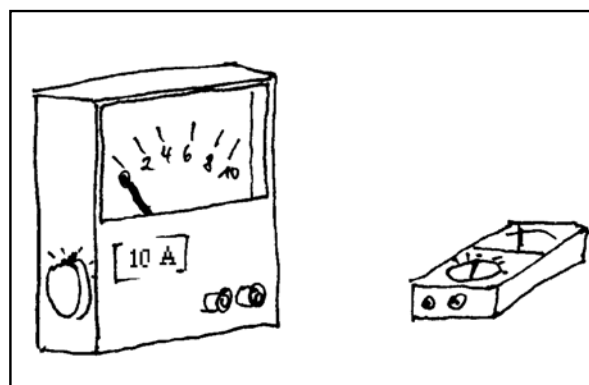


Fig. 16.8. Due amperometri.

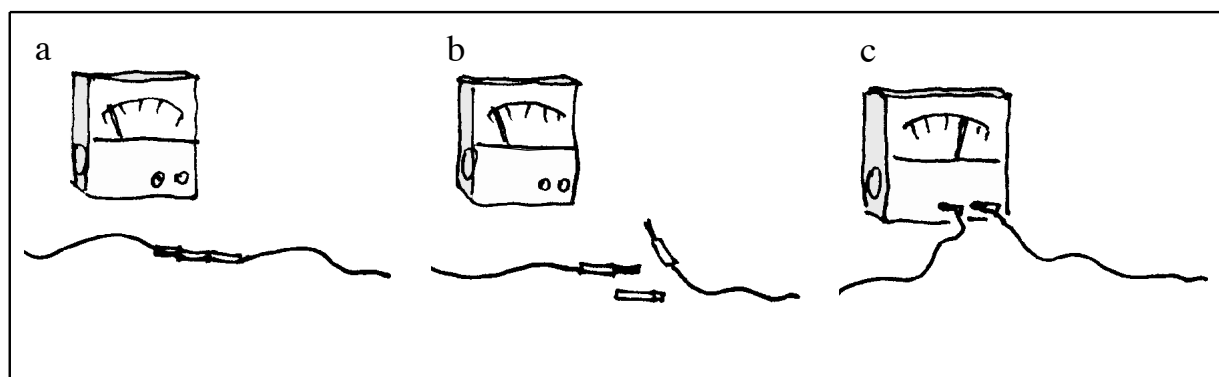


Fig. 16.9. Come misurare l'intensità della corrente elettrica in un filo.

mente lo stesso valore. In ogni punto del circuito deve scorrere la stessa quantità di elettricità ogni secondo, o più precisamente: attraverso ogni sezione del filo.

Possiamo anche inserire diversi amperometri nel circuito senza che l'intensità della corrente cambi, fig. 16.12. Ogni amperometro segna 0,5 A. È come se misurassimo con tre cronometri contemporaneamente il tempo impiegato da qualcuno a correre i cento metri.

In tabella 16.2 sono elencati alcuni valori tipici di intensità di corrente.

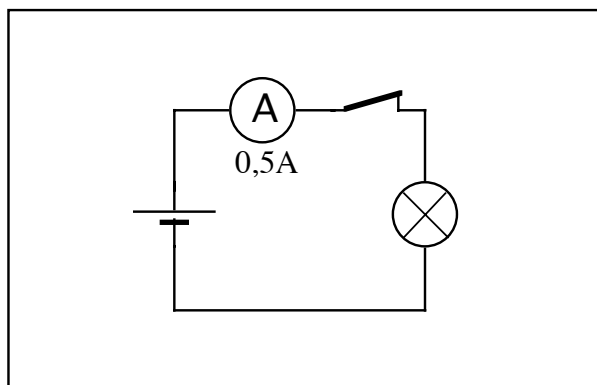


Fig. 16.10. Il circuito di fig. 16.1 con inserito un amperometro.

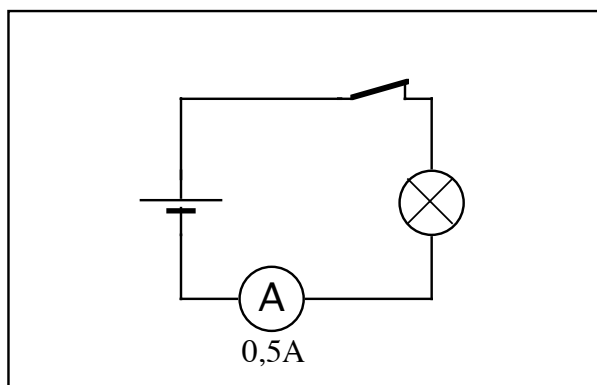


Fig. 16.11. Independentemente dal punto dove viene inserito nel circuito, l'amperometro segna sempre lo stesso valore.

16.3 La regola dei nodi

Un punto dove si incontrano diverse correnti si chiama *nodo*, non conta di che corrente si tratta: corrente di energia, corrente d'acqua o corrente elettrica.

La fig. 16.13 mostra un dispositivo costituito da elementi elettrici, che non rappresenta più un circuito elettrico nella sua forma più semplice. Uno schema del genere viene detto circuito elettrico ramificato.

Lo schema elettrico di fig. 16.13 contiene due nodi: il nodo P e il nodo Q. L'elettricità proviene dal polo positivo della batteria. Nel nodo P la corrente elettrica si ramifica. Una parte dell'elettricità scorre attraverso la lampadina di sinistra, il resto attraverso quella di destra. Nel nodo Q le due correnti si riuniscono nuovamente. Da Q in avanti tutta l'elettricità

Tabella 16.2

Intensità della corrente	
attraverso una lampadina da 75 W	0,34 A
nei conduttori di una calcoltrice tascabile	0,01 mA
nel motore di una locomotiva elettrica	500 A
in un lampo	alcune migliaia di A
nel motorino di un giocattolo	1 A

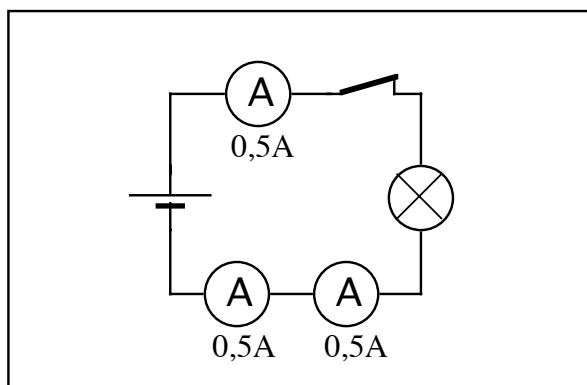


Fig. 16.12. Diversi amperometri inseriti "uno dopo l'altro" segnano lo stesso valore di uno solo.

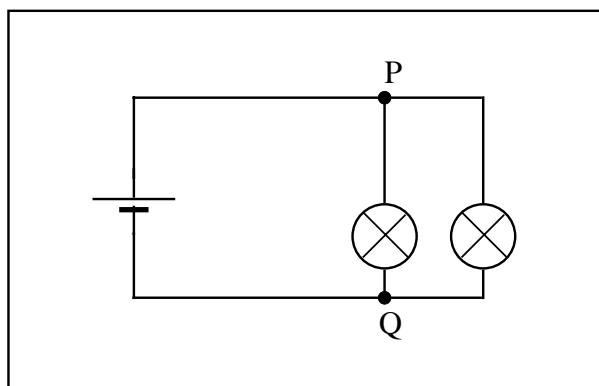


Fig. 16.13. Il circuito ramificato include i nodi P e Q.

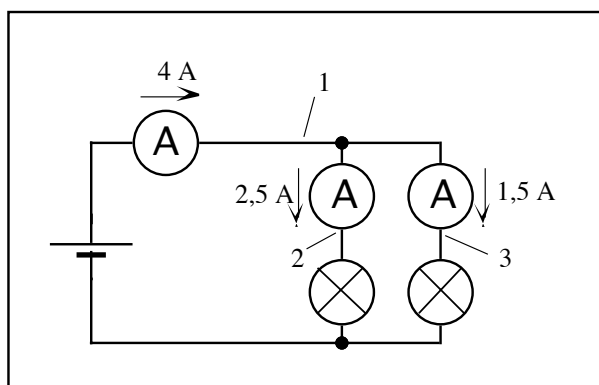


Fig. 16.14. Nel circuito di fig. 16.13 sono stati inseriti due amperometri.

scorre al polo negativo della batteria e, attraverso la batteria, torna al polo positivo.

La fig. 16.14 mostra lo stesso dispositivo di fig. 16.13, ma con tre amperometri inseriti nel circuito. L'amperometro che misura l'intensità I_1 della corrente nel conduttore 1, quindi prima della ramificazione, indica 4 ampere. Verso il nodo P scorrono 4 coulomb ogni secondo. L'amperometro nel conduttore 2 indica 2,5 A. Quindi attraverso questo conduttore defluiscono dal nodo P 2,5 C al secondo. Quanto indica il terzo amperometro? Affinché il bilancio sia corretto, da P dovrebbero defluire 1,5 C al secondo. Di conseguenza l'intensità della corrente nel conduttore 3 è 1,5 A.

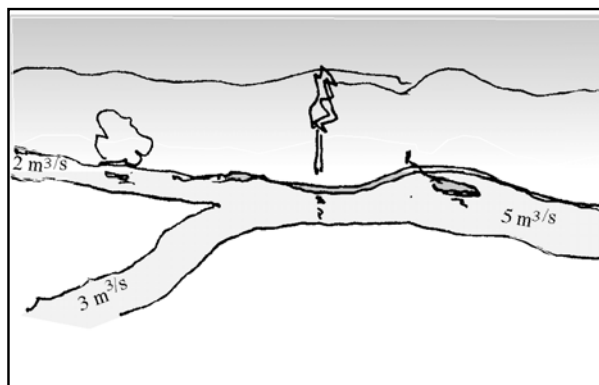


Fig. 16.15. La regola dei nodi vale anche per la confluenza di due fiumi.

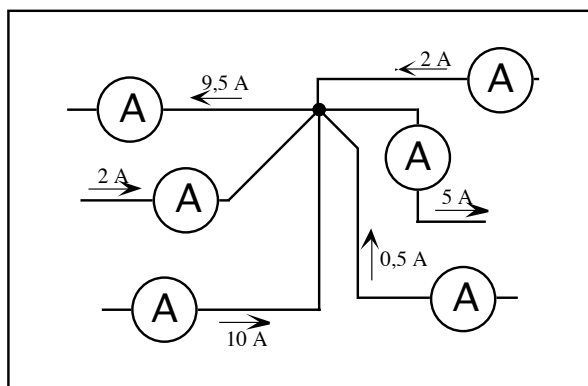


Fig. 16.16. Dettaglio di un circuito complesso con sei conduttori che confluiscono in un nodo.

La situazione è identica a quella della confluenza di due fiumi, fig. 16.15. Anche in questo caso dal "nodo" deve defluire la stessa quantità che affluisce al "nodo".

La fig. 16.16 mostra una sezione di uno schema elettrico particolarmente complicato. In un nodo si incontrano 6 correnti. Verifica che il bilancio sia esatto.

Abbiamo applicato la nostra ben nota regola dei nodi:

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

Esercizi

1. Qual è l'intensità della corrente che scorre dal punto P in fig. 16.17a? In che direzione scorre?
2. Qual è l'intensità della corrente che scorre dal punto P in fig. 16.17b? In che direzione scorre?
3. Cosa possiamo dire delle intensità delle correnti nei punti P e Q in fig. 16.18a?
4. (a) Inserisci due interruttori nel circuito in fig. 16.18b in modo che le lampadine si possano accendere e spegnere separatamente. (b) Inserisci un solo interruttore in modo che le lampadine si possano accendere e spegnere assieme.

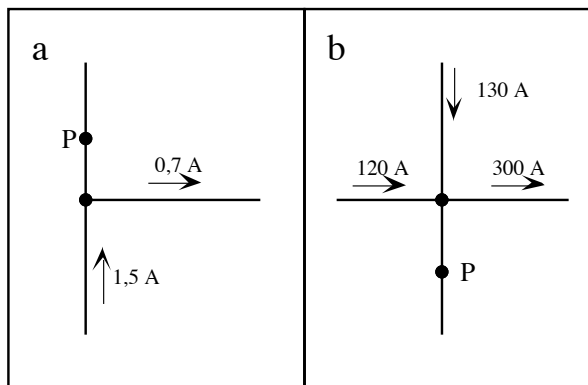


Fig. 16.17. Per gli esercizi 1 e 2

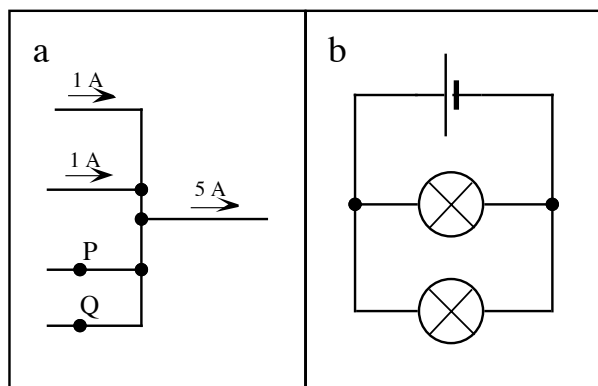


Fig. 16.18. Per gli esercizi 3 e 4

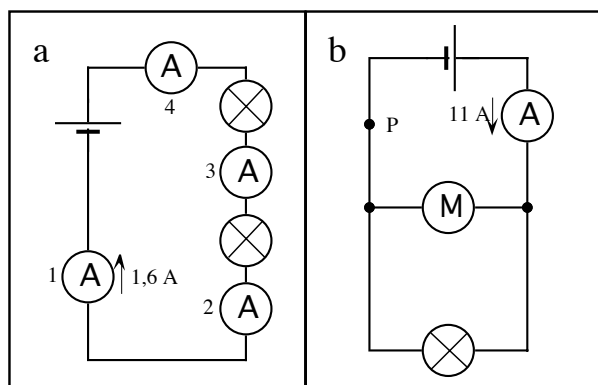


Fig. 16.19. Per gli esercizi 5 e 6

5. Che valore indicano gli amperometri 2, 3 e 4 in fig. 16.19a?

6. Qual è l'intensità della corrente nel punto P in fig. 16.19b? Inserisci nel circuito un amperometro che misuri l'intensità della corrente attraverso il motore e uno che misuri l'intensità della corrente attraverso la lampadina.

16.4 Il potenziale elettrico

Una pompa idraulica fa in modo che l'acqua all'uscita abbia una pressione maggiore che all'entrata, fig. 16.20. Genera una differenza di potenziale. Questa differenza di potenziale può essere la spinta per una corrente d'acqua.

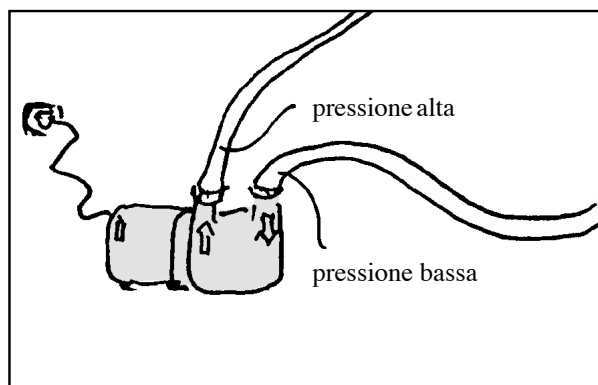


Fig. 16.20. All'uscita della pompa idraulica la pressione è maggiore che all'entrata.

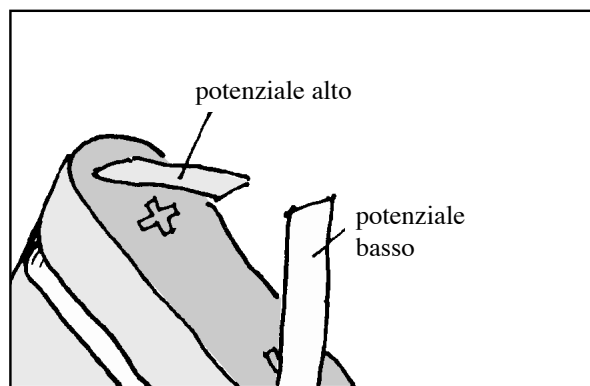


Fig. 16.21. Il potenziale elettrico è maggiore al polo positivo della batteria (uscita) che non al polo negativo (entrata).

Anche una batteria, cioè una pompa di elettricità, genera una spinta. E anche in questo caso c'è una grandezza che a un polo, il polo positivo, ha un valore maggiore che all'altro, il polo negativo, fig. 16.21. Questa grandezza si chiama *potenziale elettrico*. Il potenziale elettrico in un circuito elettrico corrisponde alla pressione in un circuito idraulico.

Una batteria genera una *differenza* di potenziale e questa differenza di potenziale rappresenta la spinta per una corrente elettrica.

Una pompa di elettricità (batteria, dinamo) genera una differenza di potenziale. La differenza di potenziale è la spinta per una corrente elettrica.

Al polo positivo il potenziale è più elevato che al polo negativo.

La fig. 16.22 mostra alcune pompe di elettricità: tre diversi tipi di batteria. Su tutte queste sorgenti di energia è indicata la differenza di potenziale.

L'unità di misura del potenziale è il volt, abbreviato V. Una comune batteria cilindrica genera una differenza di potenziale di 1,5 V, una batteria piatta 4,5 V e una batteria d'auto 12 V.

Invece di differenza di potenziale si dice spesso *tensione elettrica*, o semplicemente *tensione*. Quindi, tra i collegamenti di una batteria piatta c'è una tensione di 4,5 V.

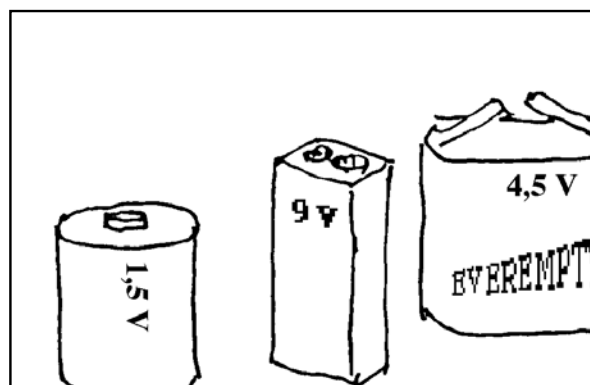


Fig. 16.22. Tre "pompe di elettricità" con i relativi valori di tensione.

Tabella 16.3

Nome della grandezza	potenziale elettrico	tensione elettrica
Abbreviazione	φ	U
Nome dell'unità di misura	volt	volt
Abbreviazione	V	V

Una differenza di potenziale viene detta tensione.

Come simbolo per il potenziale usiamo la lettera greca φ (leggi: fi), come simbolo per la tensione U . Quindi per la nostra batteria piatta

$$\varphi_+ - \varphi_- = 4,5 \text{ V},$$

oppure

$$U = 4,5 \text{ V}.$$

In tabella 16.3 sono riassunti i nomi, le unità di misura e le abbreviazioni di queste grandezze.

Per scoprire il valore di una differenza di potenziale non dobbiamo necessariamente fidarci dell'indicazione riportata sulla batteria, visto che le tensioni sono facili da misurare. Per farlo abbiamo bisogno di un voltmetro. Un voltmetro ha due collegamenti

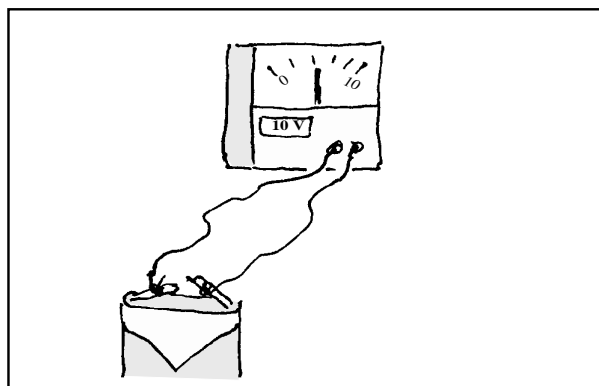


Fig. 16.23. Per misurare la tensione elettrica tra due punti li si allaccia ai collegamenti di un voltmetro.

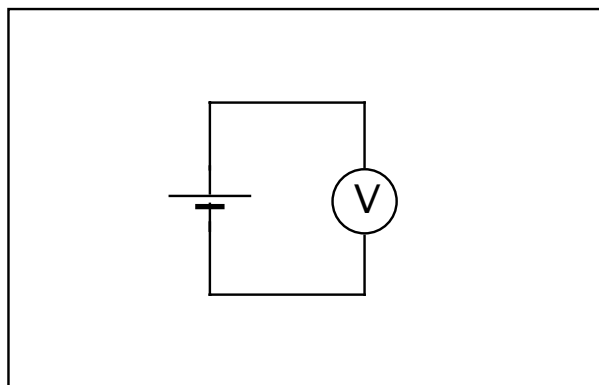


Fig. 16.24. Lo stesso dispositivo di fig. 16.23 rappresentato in simboli.

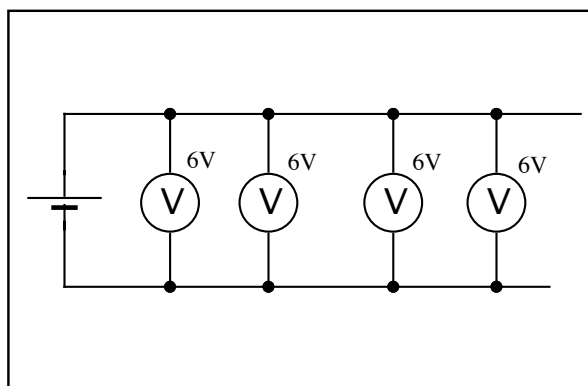


Fig. 16.25. Parecchi voltmetri "collegati in serie" segnano la stessa tensione di uno solo.

(come un amperometro). Per misurare la tensione tra due punti di un circuito colleghiamo entrambi i punti con il voltmetro, fig. 16.23 e 16.24.

I punti collegati tra loro da un cavo si trovano allo stesso potenziale. Di conseguenza i quattro voltmetri in fig. 16.25 indicano la stessa tensione.

I voltmetri sono costruiti in modo da essere attraversati da una corrente elettrica molto piccola. Un amperometro inserito in una derivazione verso un voltmetro, indicherà quindi, se non è molto sensibile, 0 A, fig. 16.26.

Quando una batteria è vuota (cioè quando tutta l'energia è uscita), naturalmente non riesce più a generare una differenza di potenziale. Perciò con un voltmetro possiamo verificare se una batteria è ancora utilizzabile.

Un *alimentatore* è una sorgente elettrica di energia che deve essere inserito nella presa. Un alimentatore riceve quindi energia con il portatore elettricità e la cede nuovamente con l'elettricità. C'è comunque una differenza tra entrata e uscita: la tensione elettrica all'uscita dell'alimentatore non è la stessa che all'entrata. Spesso la tensione all'uscita di un alimentatore è regolabile. Inoltre, tra i poli di una presa c'è una cosiddetta tensione alternata (una tensione il cui valore cambia molto rapidamente con il passare del tempo), mentre all'uscita della maggior parte degli alimentatori c'è una tensione continua, cioè una tensione costante nel tempo.

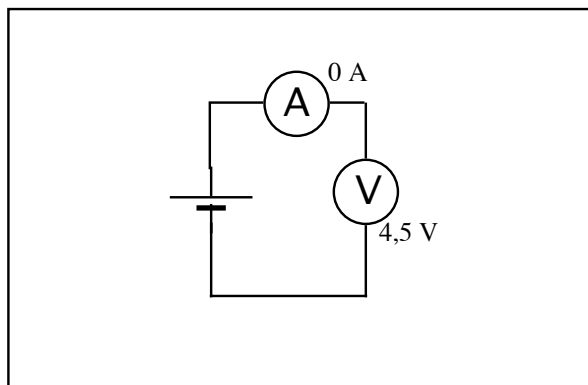


Fig. 16.26. Attraverso il voltmetro non scorre (quasi) corrente elettrica. L'amperometro indica 0 A.

16.5 Lo zero del potenziale

Sul tavolo di fronte a te c'è una batteria piatta piena. La differenza di potenziale tra i collegamenti è 4,5 V, il potenziale al polo positivo è quindi di 4,5 V più alto che al polo negativo. Ma quanto vale il potenziale al polo negativo? E quanto vale al polo positivo?

Non è facile rispondere a queste domande. La soluzione del problema ci apparirà più chiara se prima ci occupiamo di un'altra domanda. La fig. 16.27 mostra un'asta di legno lunga un metro posata verticalmente su un tavolo. Ci chiediamo: a che altezza si trova l'estremità superiore dell'asta? Per ora quello che possiamo dire è che l'estremità superiore si trova 1 m sopra quella inferiore. Ma a che altezza si trova l'estremità inferiore? La risposta a questa domanda dipende dal riferimento che scegliamo: il pavimento del locale, il livello del terreno all'esterno della casa o un qualche altro livello. Sai sicuramente che è pratica comune esprimere l'altitudine di un terreno rispetto al livello del mare. Si pone arbitrariamente a 0 m l'altitudine della superficie del mare. In teoria potremmo dare l'altezza dell'estremità superiore dell'asta rispetto al livello del mare. In pratica non è quasi mai facile determinare la distanza dal livello del mare.

Il potenziale si comporta in modo analogo all'altitudine. Dobbiamo innanzitutto stabilire a quale conduttore attribuire il valore di potenziale 0 V. A partire da lì, possiamo dare i valori di potenziale a tutti gli altri fili, collegamenti elettrici, ecc. Il conduttore scelto come riferimento per i valori del potenziale deve naturalmente essere accessibile a tutti. Un conduttore che soddisfa queste condizioni è la Terra. Abbiamo quindi stabilito che:

Il potenziale della Terra è 0 V.

Se colleghiamo con un filo un qualsiasi punto di un circuito e la Terra, siamo certi che quel punto si trova a 0 V. Si dice che il punto è stato *messo a terra*.

Per mettere a terra qualcosa non c'è nemmeno bisogno di tirare una linea fino a terra. Il contatto di terra di una presa è collegato al cosiddetto condutto-

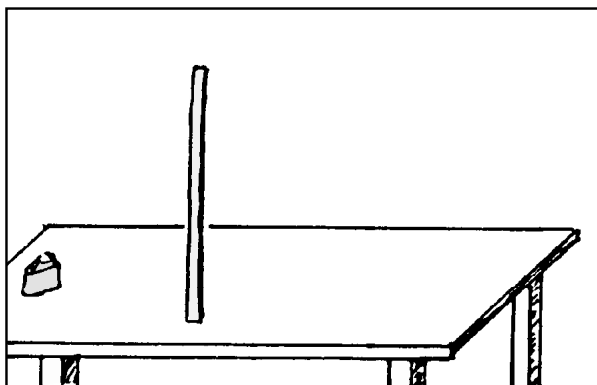


Fig. 16.27. Qual è il potenziale del polo positivo della batteria? A quale altezza si trova l'estremità superiore della sbarra metallica?

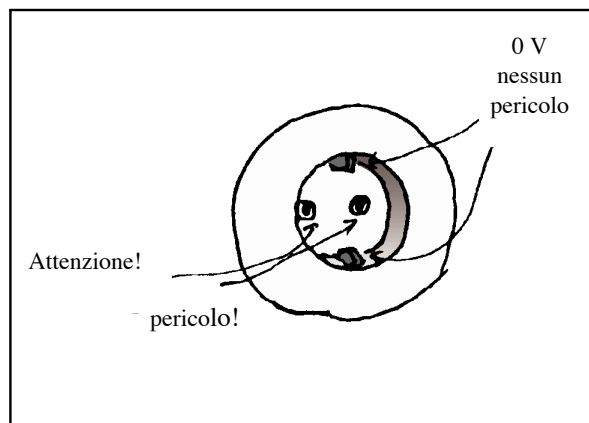


Fig. 16.28. Il contatto di sicurezza in una presa si trova al potenziale della Terra.

re neutro della rete elettrica, e questo conduttore neutro è messo a terra. Quindi il contatto di terra di una presa si trova a 0 V, fig. 16.28.

Torniamo ora alla batteria sul tavolo di fronte a te. Dopo quanto detto, sappiamo di non poter conoscere i valori di potenziale ai poli positivo e negativo, esattamente come non conosciamo le altitudini delle estremità dell'asta. Con la batteria però, possiamo facilmente chiarire la situazione: mettiamo a terra uno dei due poli. La fig. 16.29a mostra una batteria piatta con il polo negativo messo a terra (nota il simbolo per la messa a terra), cioè con

$$\varphi_- = 0 \text{ V.}$$

Di conseguenza, per il polo positivo

$$\varphi_+ = 4,5 \text{ V.}$$

In fig. 16.29b è il polo positivo a essere messo a terra. Questa volta

$$\varphi_+ = 0 \text{ V}$$

e

$$\varphi_- = -4,5 \text{ V.}$$

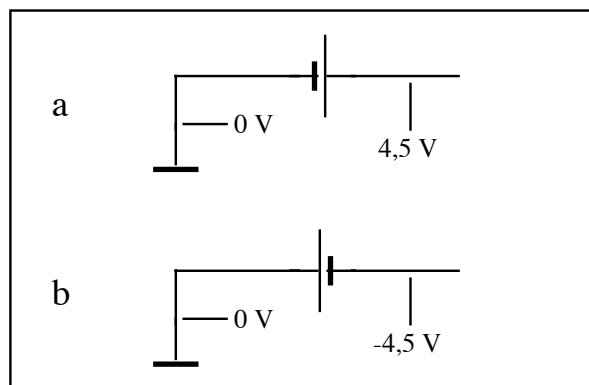


Fig. 16.29. (a) Il polo negativo della batteria è messo a terra, il polo positivo ha il potenziale di +4,5 V. (b) Il polo positivo è messo a terra. Il polo negativo ha un potenziale di -4,5 V.

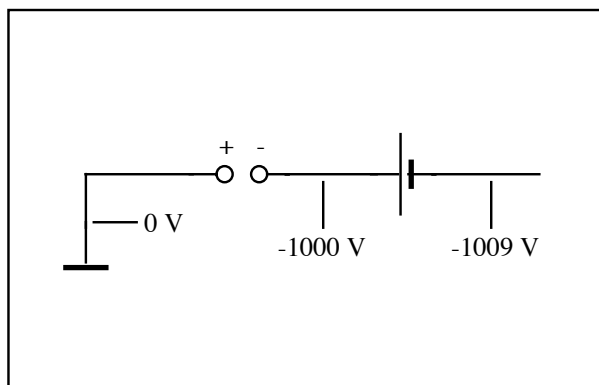


Fig. 16.30. Il polo positivo della batteria ha un potenziale di meno mille volt.

Ora il potenziale del polo negativo è negativo. Ovviamente in entrambi i casi, cioè in fig. 16.29a e in fig. 16.29b

$$\varphi_+ - \varphi_- = 4,5 \text{ V.}$$

I termini polo positivo e polo negativo sono entrati nell'uso comune ma sono un po' fuorvianti. Suggestiscono che il potenziale del polo positivo sia sempre positivo e quello del polo negativo sempre negativo. Già la fig. 16.29 dimostra che non è necessariamente così. In fig. 16.29a il polo negativo ha potenziale 0 V, quindi non potenziale negativo; e in fig. 16.29b il potenziale del polo positivo non è positivo. In fig. 16.30 lo vediamo ancora più chiaramente. Una batteria da 9 V e un alimentatore da 1000 V sono "allacciati uno dopo l'altro". Il polo positivo dell'alimentatore è messo a terra, il suo potenziale è 0 V. Il suo polo negativo si trova 1000 V più in basso, cioè a -1000 V. Visto che il polo positivo della batteria è collegato al polo negativo dell'alimentatore, anche il polo positivo della batteria è a -1000 V. Quindi il potenziale del polo positivo della batteria è negativo.

La fig. 16.31 mostra un circuito che in un punto è messo a terra.

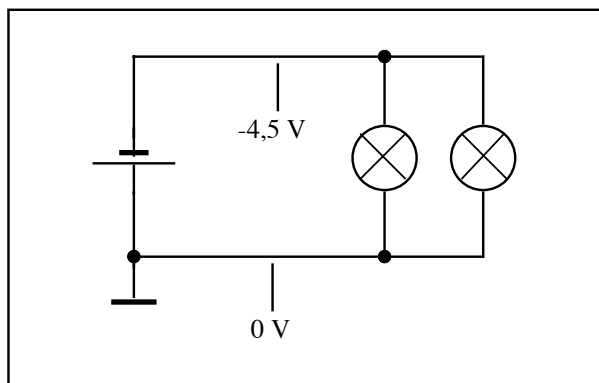


Fig. 16.31. Circuito messo a terra.

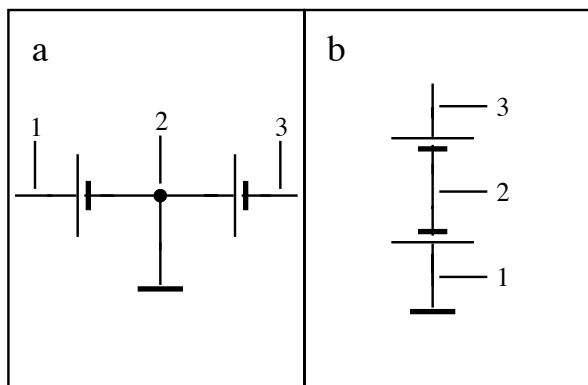


Fig. 16.32. Per gli esercizi 1 e 2

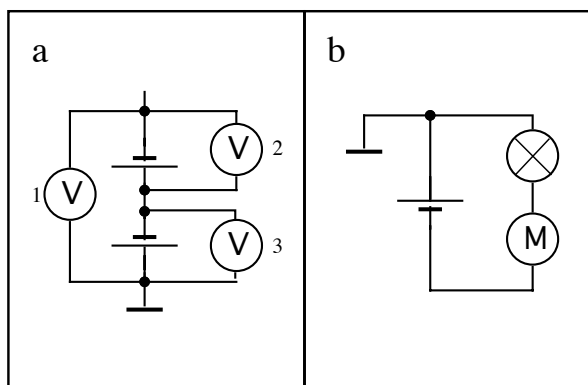


Fig. 16.33. Per gli esercizi 3 e 4

Esercizi

1. Le batterie in fig. 16.32a generano ognuna una tensione di 4,5 V. A che potenziale si trovano i punti 1, 2 e 3?
2. Ognuna delle batterie in fig. 16.32b genera una differenza di potenziale di 12 V. A che potenziale si trovano i punti 1, 2 e 3?
3. Due batterie da 9 V sono allacciate l'una all'altra, fig. 16.33a. Cosa indicano i tre voltmetri?
4. Disegna in fig. 16.33b un voltmetro che misuri la tensione ai capi della lampadina. Disegna un voltmetro che misuri la tensione della batteria.
5. Cita alcuni esempi di circuiti che non possono essere messi a terra.

16.6 Spinta e intensità di corrente

Collegiamo un motore elettrico una volta a una batteria da 6 V e un'altra a una batteria da 9 V, fig. 16.34. Naturalmente nel secondo caso il motore gira più rapidamente che nel primo. Dall'amperometro leggiamo che nel secondo caso la corrente è più intensa che nel primo.

Collegiamo una lampadina a un alimentatore regolabile e aumentiamo lentamente la tensione. Più alta è la tensione, più intensa è la corrente che scorre attraverso la lampadina.

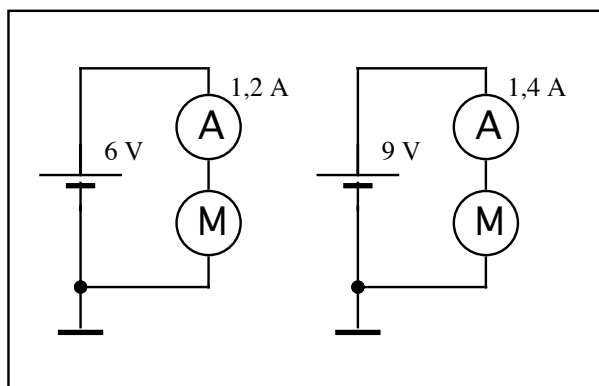


Fig. 16.34. Più è alta la tensione applicata al motore, più intensa è la corrente che lo attraversa.

I due esperimenti mostrano ciò che sicuramente già ti aspettavi: più alta è la tensione, più intensa è la corrente.

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

Collegiamo a una batteria, una dopo l'altra, due lampadine di diversa costruzione, fig. 16.35. Constatiamo che la corrente che attraversa una lampadina è più intensa di quella che attraversa l'altra. Evidentemente le due lampadine non oppongono la stessa *resistenza* alla corrente. Si dice anche che le lampadine non *hanno* la stessa resistenza.

Abbiamo visto che l'intensità della corrente che scorre attraverso un apparecchio (ad esempio una lampadina o un motore) dipende da due cose:

- dalla tensione tra i collegamenti dell'apparecchio
- dalla resistenza che l'apparecchio oppone alla corrente.

L'intensità della corrente che attraversa un apparecchio è maggiore quando:

- la differenza di potenziale tra i collegamenti dell'apparecchio è maggiore;
- la resistenza che l'apparecchio oppone alla corrente è minore.

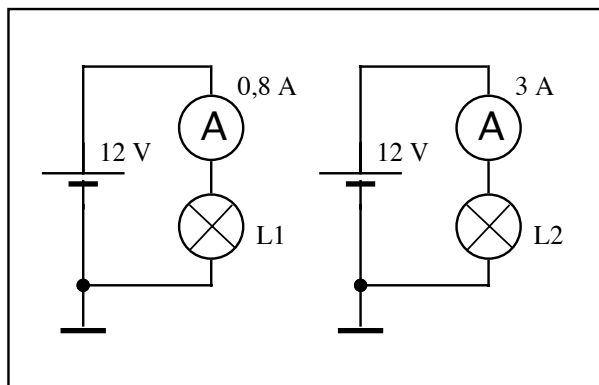


Fig. 16.35. La lampadina nel circuito a destra ha una resistenza minore di quella nel circuito a sinistra.

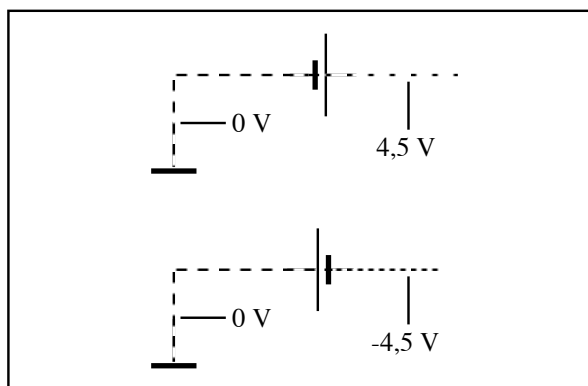


Fig. 16.36. Conduttori tratteggiati in modo diverso sono a un potenziale diverso.

16.7 Problemi elettrotecnici

Ora faremo conoscenza con un metodo che ci faciliterà la soluzione di problemi elettrotecnici

Ogni volta che si ha davanti lo schema elettrico di un dispositivo, per prima cosa si ripassano con i colori tutti i conduttori in modo che quelli con lo stesso potenziale abbiano anche lo stesso colore. È chiaro che un filo avrà un unico colore. Attraversando un apparecchio elettrico (lampadina, motore, batteria, dinamo, ecc.) cambia colore.

Le figg. da 16.36 a 16.38 mostrano alcuni esempi. (Visto che questo libro non è stampato a colori i conduttori sono rappresentati con un diverso tratteggio.)

In fig. 16.36 è rappresentata con il nuovo metodo la batteria di fig. 16.29 con i relativi conduttori. La fig. 16.37 mostra nuovamente le lampadine in parallelo di fig. 16.31 e la fig. 16.38 mostra un circuito in cui appaiono quattro diversi valori di potenziale.

Vogliamo applicare a due problemi questo metodo di marcatura con i colori dei conduttori:

1. Le lampadine 1 e 2 in fig. 16.37 sono assolutamente identiche. Nel punto P scorre una corrente di 3 A. Qual è l'intensità della corrente nella lampadina 1 e quale nella 2?

Visto che per i punti di diramazione vale la regola dei nodi

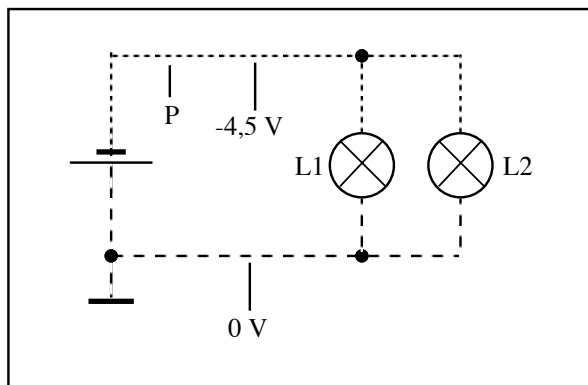


Fig. 16.37. Il circuito di fig. 16.31. I potenziali sono rappresentati da tratteggiature diverse.

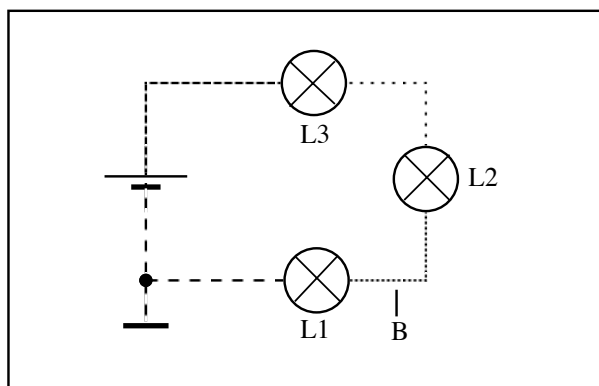


Fig. 16.38. In questo circuito ci sono quattro diversi potenziali.

$$I_{L1} + I_{L2} = 3 \text{ A.}$$

(I_{L1} e I_{L2} sono le intensità delle correnti nelle lampadine.) Dalla marcatura a colori vediamo che la tensione è la stessa per le due lampadine (in particolare la stessa che c'è alla batteria). Quindi la spinta per la corrente elettrica è la stessa in entrambe le lampadine. Visto che le lampadine sono identiche, anche le correnti devono avere la stessa intensità, quindi

$$I_{L1} = I_{L2} = 1,5 \text{ A.}$$

2. Il tratto di conduttore B in fig. 16.38 si trova a un potenziale di 6 V. Le lampadine 1, 2 e 3 sono identiche. Che tensione genera la batteria?

Visto che il circuito non è ramificato l'intensità della corrente è dappertutto la stessa. La tensione ai capi della lampadina 1 è di 6 V. Rappresenta la spinta per la corrente attraverso la lampadina 1. Visto che la stessa corrente attraversa le lampadine 2 e 3 e che queste lampadine sono identiche alla 1, anche l'elettricità che le attraversa ha bisogno della stessa spinta, cioè di 6 V per ognuna. Quindi se ci si muove dal polo positivo della batteria a quello negativo passando dalle tre lampadine, si scende a 0 V in tre passi successivi di 6 V l'uno, perciò il polo positivo deve essere a 18 V.

In entrambi gli esempi il potenziale all'entrata di una lampadina era diverso che all'uscita. Questa regola non è sempre valida. Una lampadina che non è

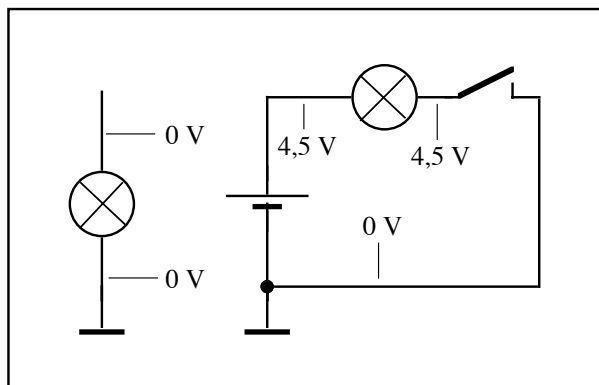


Fig. 16.39. Visto che attraverso la lampadina non fluisce corrente, i due collegamenti devono essere allo stesso potenziale

attraversata da una corrente deve avere lo stesso potenziale all'entrata e all'uscita, altrimenti una corrente ci sarebbe. La fig. 16.39 mostra due esempi.

Esercizi

1. Le batterie in fig. 16.40a sono batterie piatte da 4,5 V. Marca i punti allo stesso potenziale e determina i valori del potenziale in ogni tratto di conduttore.

2. L'intensità della corrente elettrica che scorre nella batteria in fig. 16.40b è 1,6 A. Segna i punti allo stesso potenziale. Qual è l'intensità della corrente nelle lampadine?

3. Il potenziale elettrico nel tratto C in fig. 16.41 è 20 V. Le tre lampadine sono identiche. Segna i punti allo stesso potenziale. Trova i valori del potenziale nei tratti A, B e D. Che tensione fornisce la batteria? Cosa succede ai potenziali se l'interruttore viene aperto?

4. La tensione della batteria in figg. 16.42a e 16.42b vale 12 V. Le lampadine sono identiche.

Marca i punti allo stesso potenziale.

Qual è il potenziale nel punto P?

Quanto grandi sono le differenze di potenziale ai capi delle lampadine L1 e L2?

L'intensità della corrente attraverso la lampadina L1 è maggiore quando l'interruttore è chiuso (fig. 16.42a) o quando è aperto (fig. 16.42b)?

Quando la corrente attraverso la lampadina L2 è più intensa: con l'interruttore aperto o chiuso?

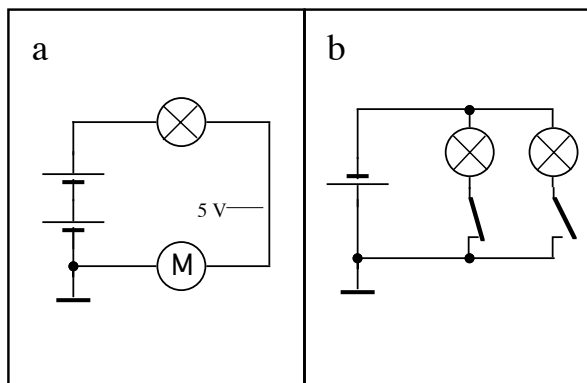


Fig. 16.40. Per gli esercizi 1 e 2

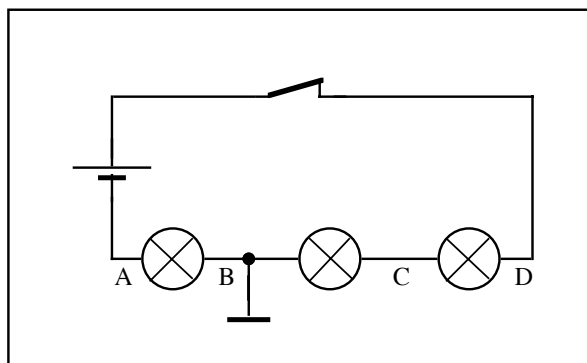


Fig. 16.41. Per l'esercizio 3

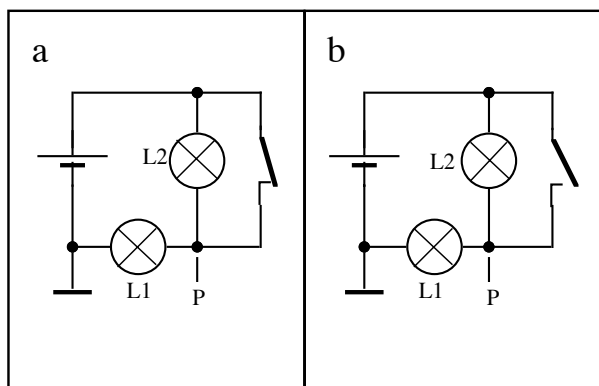


Fig. 16.42. Per l'esercizio 4

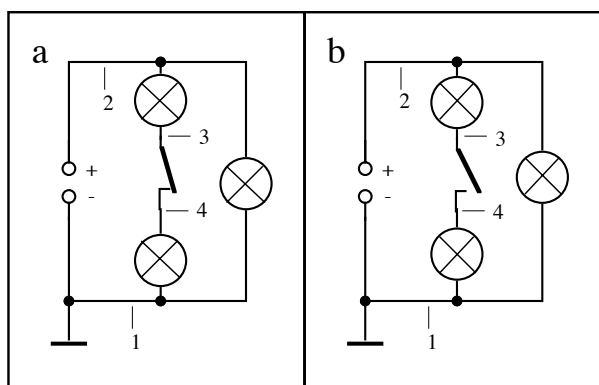


Fig. 16.43. Per l'esercizio 5

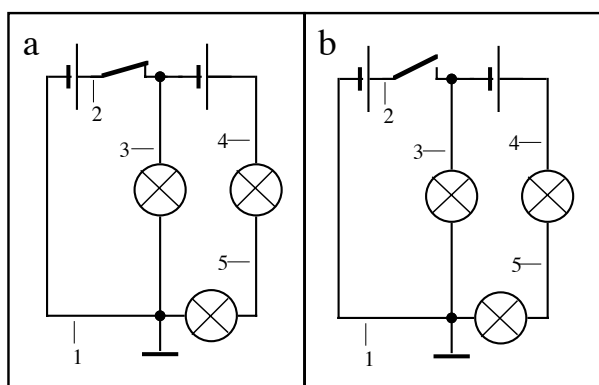


Fig. 16.44. Per l'esercizio 6

5. La tensione dell'alimentatore in figg. 16.43a e 16.43b è di 150 V, le lampadine sono identiche.

Marca i punti allo stesso potenziale.

Trova i valori del potenziale per ogni tratto di conduttore.

Quale lampadina rimane accesa se si apre l'interruttore?

6. Le batterie in figg. 16.44a e 16.44b hanno una tensione di 9 V. Le lampadine sono identiche. Marca i punti allo stesso potenziale e trova i valori del potenziale per ogni tratto di conduttore.

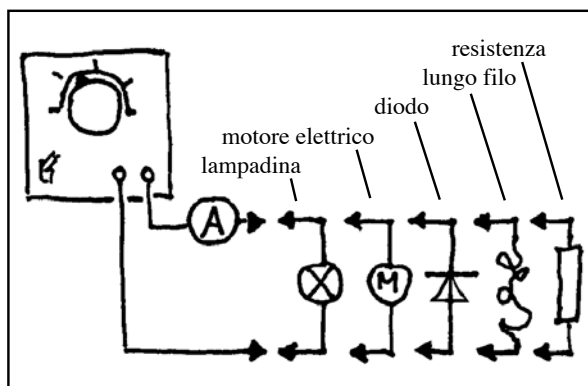


Fig. 16.45. Come ottenere una curva caratteristica: si varia il valore della tensione e si misura di volta in volta l'intensità della corrente elettrica causata dalla tensione.

16.8 La resistenza elettrica

Se vogliamo che una corrente elettrica scorra attraverso un oggetto applichiamo una tensione, forniamo una spinta. Qualsiasi oggetto però tende a ostacolare questa corrente. Oppone una resistenza allo scorrere dell'elettricità. Diciamo anche: *ha* una resistenza.

Alcuni oggetti hanno una resistenza elevata, conducono male la corrente elettrica o non la conducono affatto. Altri hanno una piccola resistenza, conducono bene l'elettricità.

I cavi elettrici per esempio, hanno una resistenza piccola. Questo non vuol dire che non abbiano resistenza del tutto.

Il modo in cui una corrente elettrica che scorre attraverso un oggetto reagisce alla tensione applicata, può essere una questione complessa. Se aumentiamo la tensione, l'intensità della corrente di solito - ma non sempre - aumenta.

Vogliamo esaminare la relazione tra tensione e intensità della corrente per alcuni oggetti elettrici. La fig. 16.45 mostra come si fa: colleghiamo l'oggetto da esaminare a un alimentatore di cui sia possibile variare la tensione. Il valore della tensione può essere letto grazie alla manopola sull'alimentatore. (Se non vogliamo affidarci alla scala della manopola-

U (V)	I (A)	U (V)	I (A)
-6	-2,7	1	1
-5	-2,5	2	1,6
-4	-2,3	3	2
-3	-2	4	2,3
-2	-1,6	5	2,5
-1	-1	6	2,7
0	0		

Fig. 16.46. Tabella dei valori per la curva caratteristica di una piccola lampadina.

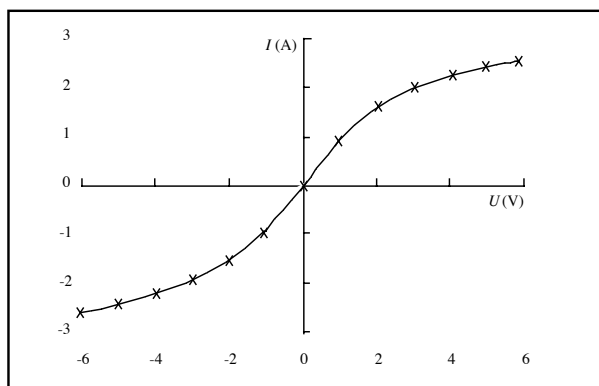


Fig. 16.47. Curva caratteristica di una lampadina. I valori corrispondenti sono in fig. 16.46.

la, possiamo naturalmente misurare la tensione per conto nostro.) L'intensità della corrente elettrica provocata dalla tensione viene letta sull'ampometro. Variamo i valori di tensione e per ogni valore di tensione leggiamo quello corrispondente dell'intensità di corrente. Dapprima inseriamo le coppie di valori ottenute in una tabella. La fig. 16.46 mostra una tabella del genere per una lampadina a incandescenza da 6 V. In seguito i valori misurati vengono riportati in un sistema di coordinate $U-I$. I punti così ottenuti vengono collegati da una linea. La curva che ne risulta è la *curva caratteristica* dell'oggetto o dell'apparecchio esaminato. La fig. 16.47 mostra la curva caratteristica della nostra lampadina da 6 V.

Se conosciamo la curva caratteristica di un apparecchio possiamo dire immediatamente quale sarà l'intensità della corrente elettrica che lo attraversa se si applica una determinata tensione.

Con la nostra lampadina abbiamo anche invertito la tensione. Un'inversione della tensione ha come conseguenza l'inversione della direzione della corrente elettrica. Nel caso della lampadina, tra la parte positiva e quella negativa della curva c'è simmetria.

La fig. 16.48 mostra la curva caratteristica di un diodo. Vediamo che questa curva non è simmetrica. Se non sai ancora a cosa serve un diodo, puoi capirlo con l'aiuto della curva caratteristica. La curva mostra che il diodo lascia passare la corrente solo in una

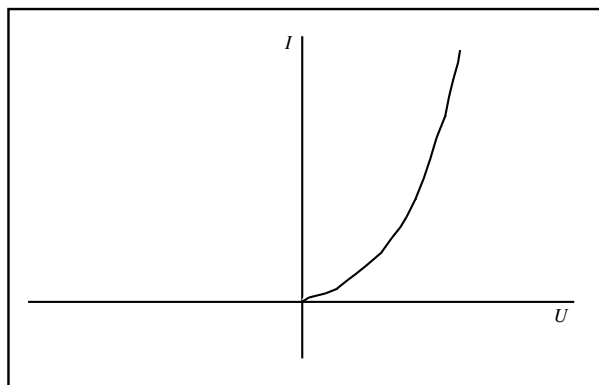


Fig. 16.48. La curva caratteristica di un diodo non è simmetrica.

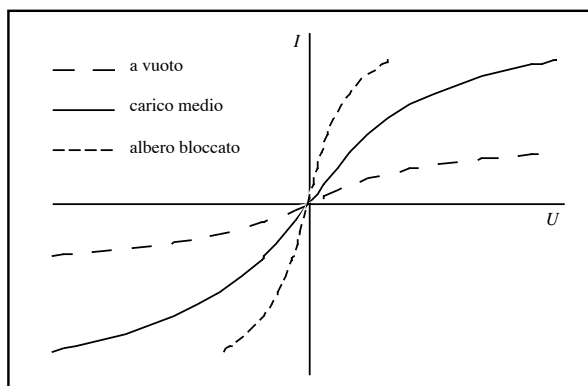


Fig. 16.49. La curva caratteristica di un motore elettrico dipende dal carico a cui è sottoposto.

direzione. Quindi è per la corrente elettrica quello che la valvola di un pneumatico di bicicletta è per la corrente d'aria.

Esaminiamo un motore elettrico. La situazione è più complicata che nei casi precedenti: a seconda del carico del motore si ottiene una curva caratteristica diversa. Tutte e tre le curve in fig. 16.49 sono state ottenute con lo stesso motore. In un caso il motore girava a vuoto, senza carico. L'intensità della corrente elettrica era sempre abbastanza bassa. La seconda curva caratteristica è stata registrata con un carico medio e la terza con l'albero motore bloccato.

Quella rappresentata in fig. 16.50 (assieme alla tabella con i valori numerici) è una curva caratteristica particolarmente semplice: la curva caratteristica di un lungo filo. Ha la forma di una retta passante per l'origine. Finora avevamo sempre supposto che un filo non avesse resistenza. La resistenza è piccola, ma c'è. La curva caratteristica del filo mostra che l'intensità della corrente è proporzionale alla tensione applicata:

$$I \sim U.$$

Si dice che il filo segue la *legge di Ohm*.

La fig. 16.51 mostra la curva caratteristica di un altro filo. Con la stessa spinta, in questo secondo filo la corrente è più debole. Quindi ha una resistenza più grande del primo.

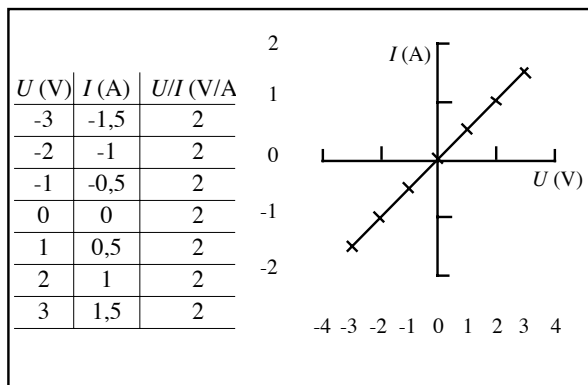


Fig. 16.50. Tavola dei valori e curva caratteristica di un filo elettrico. Il filo segue la legge di Ohm.

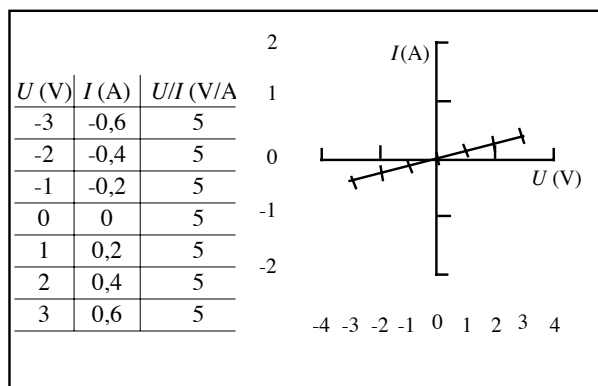


Fig. 16.51. Curva caratteristica di un filo con una resistenza maggiore di quello in fig. 16.50.

Possiamo caratterizzare la resistenza di un filo calcolando il quoziente tra tensione e intensità di corrente. Nelle tabelle delle figg. 16.50 e 16.51 è riportato il quoziente per ognuna delle coppie di valori. Per un filo ha un determinato valore, per l'altro filo un altro valore. Maggiore è la resistenza del filo, più grande è questo quoziente. Quindi chiamiamo il quoziente stesso *resistenza* del filo e lo rappresentiamo con la lettera R :

$$R = \frac{U}{I}$$

La resistenza R è una grandezza fisica. Come unità di misura si ha volt/ampere (V/A). Invece dell'espressione composta volt/ampere si usa di solito il termine *ohm*. L'unità di misura ohm viene abbreviata con la lettera greca Ω (leggi omega). Quindi:

$$\Omega = \frac{V}{A}$$

ora siamo in grado di dare la resistenza dei nostri due fili. Il primo filo (fig. 16.50) ha una resistenza di 2 Ω , il secondo (fig. 16.51) ha una resistenza di 5 Ω .

Se la curva caratteristica di un apparecchio non è una linea retta, non ha molto senso calcolare il quoziente U/I . In questo caso il quoziente ha un valore diverso per ogni punto della curva caratteristica.

Si può far qualcosa per ridurre la resistenza di un filo? Per questo dovremmo in primo luogo sapere da cosa dipende la resistenza di un filo. Approfittiamo della nostra esperienza con i tubi per l'acqua. La resistenza di un filo è maggiore

- tanto più il filo è lungo;
- tanto più il filo è sottile.

Inoltre dipende anche dal materiale di cui è fatto. Se confrontiamo fili della stessa lunghezza e dello

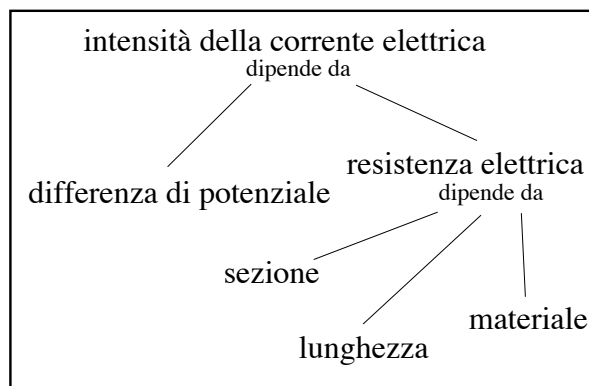


Fig. 16.52. Relazione tra corrente elettrica, differenza di potenziale e caratteristiche del conduttore.

stesso spessore ma di materiali diversi, scopriamo che i fili d'argento o di rame hanno la resistenza minore, grossomodo conducono l'elettricità ugualmente bene. La resistenza di un filo di alluminio è circa il doppio e quella di un filo di ferro circa sei volte più grande di quella di un filo di rame.

In fig. 16.52 è riassunta schematicamente la relazione tra intensità della corrente elettrica, differenza di potenziale e le proprietà del conduttore.

Ora siamo in grado di capire il funzionamento di una lampadina a incandescenza. In sostanza si tratta solo di una strozzatura in un circuito: un pezzo di conduttore che oppone una grande resistenza alla corrente elettrica. L'elettricità che scorre attraverso la strozzatura deve superare una specie di resistenza di attrito. In questo modo, come succede con l'attrito, viene prodotta entropia e questo ha come conseguenza un aumento della temperatura del filo.

La maggior parte dei riscaldamenti elettrici funziona secondo questo principio: il ferro da stiro, il riscaldamento in un asciugacapelli, ecc. Il forno a microonde e la lampada fluorescente invece, funzionano in altro modo.

Spesso in elettrotecnica ed elettronica capita di voler ostacolare di proposito una corrente elettrica. Si vuole che ci sia una resistenza. Quindi si costruiscono degli apparecchi, o "componenti," che non hanno altra funzione se non quella di opporre resistenza a una corrente. Questi componenti sono detti *resistori* o *resistenze*. I resistori sono costruiti in modo da avere come curva caratteristica una retta. Quindi seguono la legge di Ohm e possono essere caratterizzati da un valore di resistenza, cioè da un numero di ohm. La fig. 16.45 mostra il simbolo usato per le resistenze.

Per i resistori $I \sim U$.

Hai notato che abbiamo usato la parola resistenza con tre significati diversi? Se sì, dovresti essere in grado di capire la seguente (orrenda) frase: "Questa resistenza, che ha una resistenza di 10 $k\Omega$, oppone una resistenza troppo bassa alla corrente elettrica."

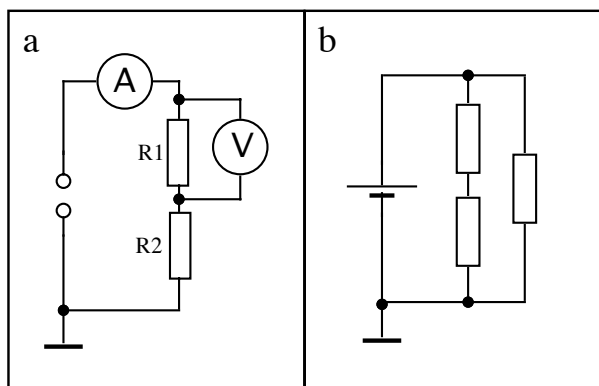


Fig. 16.53. (a) Per l'esercizio 4; (b) per l'esercizio 5

Esercizi

1. A un resistore sconosciuto viene applicata una tensione di 120 V. Misuriamo una corrente di 4 mA. Quanti Ω ha il resistore?
2. A un resistore di 2 k Ω viene applicata una tensione di 120 V. Qual è l'intensità della corrente che lo attraversa?
3. Attraverso una resistenza di 1 M Ω scorre una corrente di intensità 0,1 mA. Qual è la tensione applicata?
4. L'alimentatore in fig. 16.53a genera una tensione di 35 V. L'ampereometro indica 5 A e il voltmetro 10 V. Quanto vale la resistenza $R1$? Quanto vale la tensione applicata ai capi del resistore $R2$? Quanto vale la resistenza $R2$?

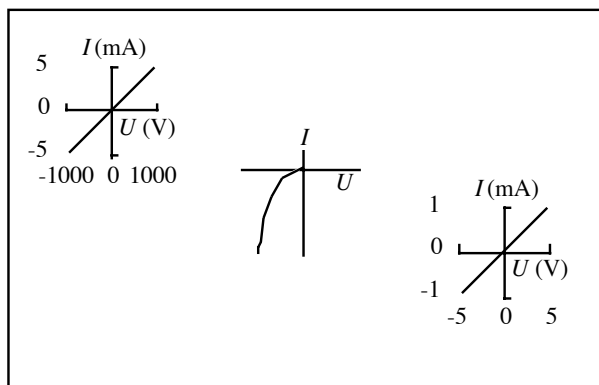


Fig. 16.54. Per l'esercizio 6

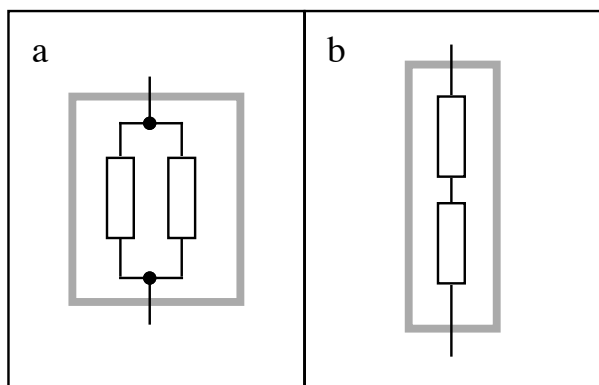


Fig. 16.55. (a) Per l'esercizio 7; (b) per l'esercizio 8

5. La tensione della batteria in fig. 16.53b è 12 V. Ogni resistore ha 100 Ω . Calcola i valori del potenziale in ogni tratto di conduttore. Che tensioni sono applicate ai tre resistori? Qual è l'intensità delle correnti elettriche che attraversano i tre resistori? Qual è l'intensità della corrente elettrica che attraversa la batteria?

6. Trovi una cassa contenente vecchi componenti elettronici e svariati apparecchi dei quali non si riesce a capire la funzione. Per tre di questi apparecchi registri la curva caratteristica e ottieni le relazioni rappresentate in fig.16.54. Di che tipo di componenti si tratta? Cerca di essere più preciso possibile.

7. Due resistori da 100 Ω vengono montati in parallelo, fig. 16.55a. Quanto vale la resistenza totale? Formula una regola.

8. Due resistori da 100 Ω vengono montati in serie, fig. 16.55b. Quanto vale la resistenza totale? Formula una regola.

16.9 Il corto circuito - l'interruttore salvavita

In fig. 16.56a i due collegamenti di una batteria sono collegati tra di loro con un cavo. In fig. 16.56b i due conduttori che collegano la batteria al motore si toccano. In entrambi i casi l'elettricità scorre direttamente dall'uno all'altro collegamento della sorgente di energia, senza prendere la deviazione che passa attraverso l'apparecchio che funge da ricevitore d'energia. Una situazione del genere si dice *corto circuito*.

Il circuito che si forma in un corto circuito ha una resistenza piccolissima. Di conseguenza scorre una corrente elettrica molto intensa. In un corto circuito la corrente elettrica può essere tanto intensa da diventare pericolosa: i conduttori si possono surriscaldare e diventare incandescenti.

Quanto intensa può diventare la corrente, dipende dalla sorgente. Nel caso di una batteria piatta, cilindrica o di sorgenti di questo tipo, il pericolo non è elevato: le correnti raggiungono intensità di pochi ampere. Con una batteria d'automobile è già un altro discorso: l'intensità della corrente in caso di corto circuito può raggiungere le centinaia di ampere. Ed in una presa di corrente sarebbe anche

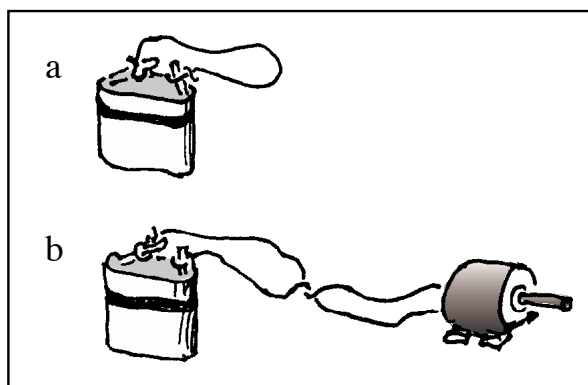


Fig. 16.56. Corto circuito: l'elettricità non passa attraverso il motore.

maggiore se non ci fosse il sistema di sicurezza per impedire che scorrano correnti troppo intense.

Un interruttore salvavita serve a interrompere il circuito non appena l'intensità della corrente elettrica supera un determinato valore. Negli impianti domestici di solito questo valore è fissato a 10 A o 16 A.

Quando viene cortocircuitata, una batteria si svuota. In questo caso "vuota" significa: vuota di energia. Ma allora dove finisce l'energia? Da un lato, come già sappiamo, i conduttori si riscaldano. E per riscaldare un filo (per produrre entropia nel filo) ci vuole energia. Questa però è solo una piccola parte dell'energia persa dalla batteria. Inoltre: se cortocircuitiamo una batteria usando un filo con pochissima resistenza, il filo non si scalda quasi. Dov'è l'energia?

Se sei disposto a sacrificare una pila lo puoi scoprire da solo. Crea un corto circuito con un filo corto e spesso. Il filo non si riscalda - ma la pila sì. Quindi, in un corto circuito viene prodotta entropia direttamente nella sorgente di energia. L'energia lascia la sorgente con il portatore entropia, e non più con il portatore elettricità.

16.10 Corrente alternata

Con due batterie piatte e un deviatore costruiamo una sorgente elettrica di energia un po' particolare e poi vi allacciamo una lampadina, fig. 16.57. Ora, a intervalli regolari, per esempio ogni 3 secondi, azioniamo l'interruttore. Il conduttore in basso rimane costantemente a 0 V, quello in alto va avanti e indietro tra i valori di potenziale +4,5 V e -4,5 V.

La fig. 16.58 mostra il potenziale in funzione del tempo. Si dice che alla lampadina è applicata una *tensione alternata*. La tensione alternata spinge la corrente elettrica, attraverso la lampadina, prima in una direzione, poi in quella opposta e così via. Scorre una *corrente alternata*.

Anche tra i poli di una presa di corrente c'è tensione alternata. Un polo è sempre al potenziale della terra. Il potenziale dell'altro polo diventa alternativamen-

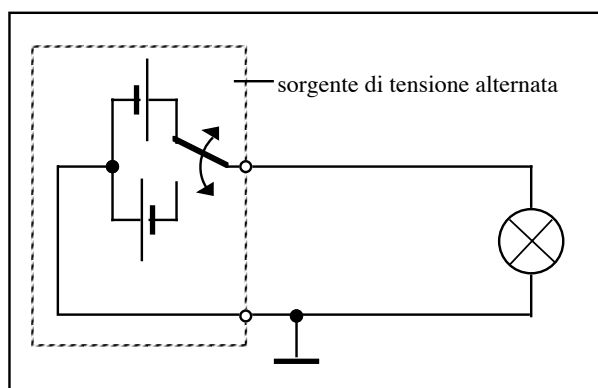


Fig. 16.57. Sorgente a tensione alternata. Un polo è costantemente al potenziale della Terra, l'altro polo alterna tra un valore positivo e uno negativo.

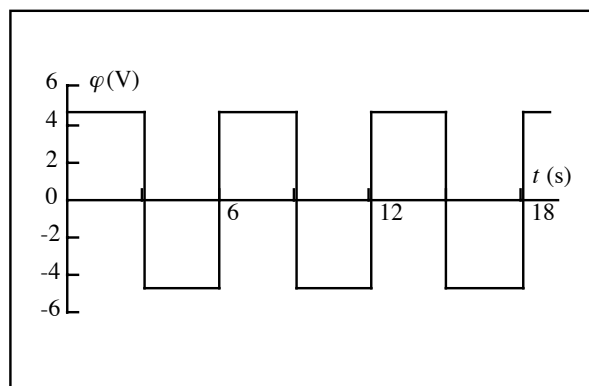


Fig. 16.58. Potenziale del conduttore superiore in fig. 16.57 in funzione del tempo.

te positivo e negativo. Rispetto alla sorgente auto-costruita di fig. 16.57 ci sono comunque delle differenze:

-in una presa di corrente il polo non a terra ha un potenziale che cambia molto più in fretta. Ogni secondo diventa 50 volte positivo e 50 volte negativo. Si dice che la *frequenza* è di 50 Hertz.

-il potenziale del polo non a terra non cambia di colpo, ma in modo più graduale, con un andamento a forma di onda, fig. 16.59. Una relazione di questo tipo è detta *sinusoidale*. La tensione tra i poli della presa cambia allo stesso modo. Due volte per oscillazione (cioè 100 volte al secondo) raggiunge il valore massimo, la tensione di picco. Inoltre, due volte per oscillazione ha il valore 0.

Ora vogliamo sperimentare un po' con le tensioni alternate. Ci serviamo di un generatore sinusoidale: un alimentatore che fornisce una tensione alternata di andamento sinusoidale e di frequenza regolabile.

Allacciamo una lampadina al generatore sinusoidale e impostiamo inizialmente l'apparecchio in modo che la tensione oscilli una volta al secondo e il valore massimo sia 5 V. Come ci si poteva aspettare la lampadina si accende e si spegne in continuazione, due volte al secondo. Ogni volta che la tensione raggiunge il valore massimo la lampadina è ben accesa, come se fosse allacciata a una sorgente di tensione

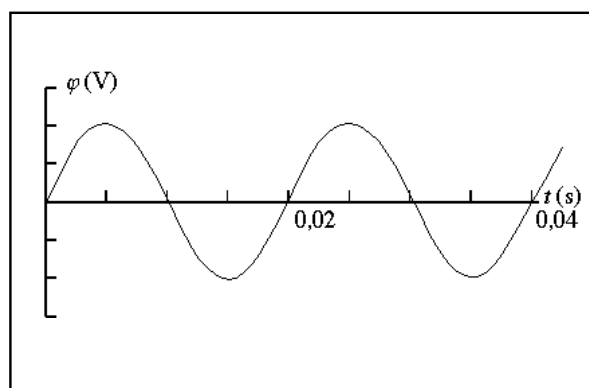


Fig. 16.59. Potenziale del polo non messo a terra di una presa in funzione del tempo.

continua di 5 V. In tutti gli altri momenti la lampadina emette meno luce o non ne emette per niente.

Ora aumentiamo la frequenza del generatore sinusoidale (stando attenti a lasciare immutata la tensione di picco). La lampadina lampeggia sempre più in fretta. Quando la frequenza raggiunge le 20 oscillazioni al secondo (20 Hertz), la lampadina rimane accesa con intensità costante. Il filo incandescente non riesce a tenere il ritmo dei rapidi cambiamenti di tensione. Però la lampadina non brilla come se fosse allacciata a una sorgente continua di 5 V. In media riceve meno energia di quanta ne riceverebbe da una sorgente continua di 5 V.

Per confronto allacciamo una seconda lampadina (identica alla prima) a un alimentatore a tensione continua e regoliamo la tensione in modo da farla brillare con la stessa intensità della prima.

Constatiamo che ci vogliono circa 3,5 V di tensione continua. Con una tensione alternata dal valore massimo di 5 V, una lampadina riceve in media la stessa energia che con una tensione continua di 3,5 V. Di conseguenza si dice che la sorgente di tensione alternata ha una *tensione efficace* di 3,5 V.

Più precisamente il fattore di conversione tra tensione efficace e tensione di picco è $\sqrt{2}$. Quindi:

tensione di picco = $\sqrt{2}$ · tensione efficace

Quando si ha a che fare con tensione alternata, *la* tensione a cui ci si riferisce è la tensione efficace. Anche il 220 V delle prese di corrente sono una tensione efficace. La tensione di picco in una presa vale

$$220 \text{ V} \cdot \sqrt{2} \approx 310 \text{ V}$$

E anche i voltmetri che misurano la tensione alternata indicano la tensione efficace.

La domanda più importante non è ancora stata posta: perché tutta questa fatica? Perché si usa così volentieri la corrente alternata? Risposta: perché c'è un metodo molto comodo per cambiare le tensioni alternate, cioè con un trasformatore. Un trasformatore è un apparecchio che aumenta o diminuisce la tensione. Lo fa con pochissima perdita di energia. Però lo può fare solo con le tensioni alternate.

Come funziona un trasformatore e che interesse c'è nell'aumentare e diminuire le tensioni, lo vedremo più avanti.

16.11 I pericoli della corrente elettrica

La corrente elettrica è pericolosa. Al giorno d'oggi lo sanno tutti. Ma di preciso cosa è pericoloso? Cosa si può fare e cosa non si può? A cosa dobbiamo stare attenti?

Una corrente elettrica che scorre attraverso un corpo umano ha effetti dannosi. Un'intensità di corrente di 50 mA può essere mortale.

Ovviamente attraverso il nostro corpo scorre una corrente elettrica solo quando ci sono *due* punti di contatto che si trovano a potenziali *diversi*. Ai passi sui fili elettrici non succede niente perché toccano un solo conduttore.

Non dobbiamo però credere che si possa toccare un polo di una presa di corrente a condizione di non toccare l'altro. Se il collegamento con la terra attraverso i nostri piedi è un buon conduttore, abbiamo già il secondo punto di contatto.

Per altro, uno dei due poli di una presa è effettivamente innocuo: ha lo stesso potenziale della terra. Potremmo toccarlo senza che ci succeda niente. Però in una presa i due poli hanno lo stesso aspetto, quindi non possiamo sapere quale dei due è pericoloso e quale innocuo.

Non toccare i due poli di una presa di corrente. Non toccare nemmeno un solo polo di una presa di corrente.

La tensione di rete può rendersi pericolosa anche in altro modo. Se l'apparecchio è bagnato l'acqua può fare da conduttore e collegare la nostra mano con un qualche filo che si trova a 220 V. Quindi possiamo prendere la scossa anche toccando parti di un apparecchio che di solito sono isolanti, come l'impugnatura di plastica di un asciugacapelli.

L'umidità sugli apparecchi elettrici è particolarmente pericolosa in quanto nei punti di contatto l'acqua può creare un collegamento con il nostro corpo.

Quando lavori con apparecchi elettrici evita l'umidità.

Se un apparecchio elettrico ha un rivestimento in metallo, o se altre parti metalliche dell'apparecchio possono essere toccate, ci sono altre sorgenti di pericolo. L'isolamento di un conduttore che si trova a potenziale molto alto potrebbe essere difettoso e il conduttore potrebbe toccare una delle parti metalliche. In questo caso la parte metallica avrebbe lo stesso alto potenziale. Per evitare questo pericolo il telaio degli apparecchi viene portato al potenziale della terra grazie ai cosiddetti *conduttori di terra*.

Il contatto di terra di una presa di corrente si trova al potenziale di terra. Il telaio di un apparecchio, per esempio la lavatrice, viene collegato al contatto di terra della presa grazie al conduttore di terra - il terzo filo, marcato in giallo e marrone, all'interno del cavo - fig. 16.60. Se il conduttore che si trova a 220 V dovesse entrare in contatto con il telaio, si creerebbe un corto circuito e le valvole di sicurezza dell'impianto elettrico della casa interromperebbero il circuito.

Spesso abbiamo a che fare con tensioni diverse da 220 V. Quali sono le tensioni pericolose? Quali valori di tensione causano nel corpo delle correnti pericolose? Dipende da come tocchiamo i conduttori tra i quali c'è tensione.

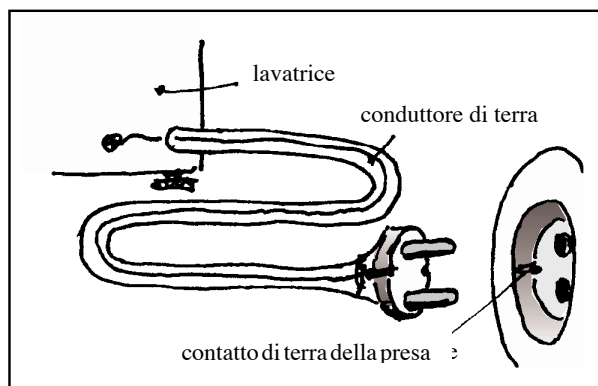


Fig. 16.60. Il telaio di una lavatrice è messo a terra grazie all'apposito conduttore.

Se li tocchiamo con la punta di due dita della stessa mano il pericolo è minore. La corrente avrà una bassa intensità in quanto la superficie di contatto è piccola. Inoltre la corrente scorre solo attraverso quella mano, quindi solo alla mano può succedere qualcosa.

Se invece tocchiamo un conduttore con una mano e l'altro con l'altra mano, il pericolo è molto maggiore. La corrente sarà più intensa a causa della

maggiore superficie di contatto (tutta la mano); inoltre la corrente che scorre da una mano fino all'altra passa, almeno in parte, anche attraverso il cuore - e naturalmente ciò è particolarmente pericoloso. Per non correre alcun rischio si dovrebbero evitare tutte le tensioni superiori a 40 V.

Non toccare mai due conduttori tra i quali c'è una tensione di più di 40 V.

A volte i vestiti si caricano elettricamente. La tensione rispetto a terra può raggiungere svariati kV (1 kV = 1000 V). Non c'è comunque nessun pericolo, perché i vestiti si scaricano molto in fretta e le correnti superano i valori pericolosi al massimo per pochi microsecondi (milionesimi di secondo) - rendendo innocue le correnti stesse.

Esercizi

1. Un asciugacapelli non allacciato è caduto in acqua. Perché è pericoloso usarlo subito dopo averlo tolto dall'acqua?
2. L'isolamento di un conduttore nel cavo di alimentazione di una lavatrice si è rovinato. Il conduttore è in contatto con il telaio della macchina. Accendendo la macchina da lavare possono succedere due cose.

17. Elettricità ed energia

17.1 L'elettricità come portatore di energia

Lampadine, motori elettrici, stufe elettriche, riscaldatori a immersione e altri apparecchi elettrici hanno bisogno di energia. Ricevono l'energia con il portatore elettricità. Nella maggior parte dei casi la sorgente è una centrale elettrica.

Una corrente di energia scorre dalla sorgente al ricevitore. Ogni secondo scorre una certa quantità di energia, un certo numero di joule. Come ricorderai: la quantità di energia E che scorre da un certo punto in un intervallo di tempo t , divisa per l'intervallo di tempo t , si chiama intensità della corrente di energia P , o in formula

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

L'unità di misura di P è joule/secondo = J/s.

L'abbreviazione per joule al secondo è "watt". Quindi

watt = joule/secondo

oppure

$$W = J/s.$$

Per trasportare elettricamente (con il portatore elettricità) l'energia, ci vuole un cavo a doppio conduttore. Nei conduttori scorre una corrente elettrica: in un conduttore dalla sorgente al ricevitore, nell'altro dal ricevitore di nuovo verso la sorgente. Tra i due conduttori c'è una tensione, vale a dire che i conduttori si trovano a potenziali diversi.

L'intensità della corrente di energia dalla sorgente al ricevitore dipende dall'intensità della corrente elettrica e dalla tensione tra i conduttori. E non è difficile ricavare questa relazione.

Confrontiamo i dispositivi nelle figg. 17.1a e 17.1b. Entrambi mostrano una coppia sorgente-ricevitore: a sinistra un alimentatore impostato su 12 V, a destra una e rispettivamente due lampadine da 12 V. Visto che le lampadine sono identiche la corrente di energia nel secondo dispositivo ha intensità doppia di quella nel primo, perché due lampadine consumano il doppio di energia di una sola. Come sono tensione e intensità di corrente nei due casi?

Le tensioni sono le stesse, il voltmetro indica 12 V in entrambi i casi.

E le correnti elettriche? L'amperometro nella prima figura indica 4 A. Ciò significa che una lampadina alla quale è applicata una tensione di 12 V viene attraversata da una corrente di 4 A. Nel secondo disegno ci sono due lampadine e la tensione è ancora di 12 V. Quindi attraverso ognuna di loro scorre una corrente di 4 A. Con la regola dei nodi concludiamo che nei lunghi tratti di conduttore tra la sorgente e il ricevitore devono scorrere 8 A.

Nel secondo dispositivo sia l'intensità della corrente di energia tra sorgente e ricevitore che l'intensità della corrente elettrica nei conduttori sono doppie rispetto al primo dispositivo. Se invece di due lampadine ne avessimo prese tre o quattro, allora anche P e I sarebbero state tre o quattro volte più grandi. Riassumiamo questo risultato: in un trasporto elettrico di energia - a tensione costante - l'intensità della corrente di energia e l'intensità della corrente elettrica sono direttamente proporzionali, in simboli:

$$P \sim I \quad \text{per } U = \text{cost} \quad (1)$$

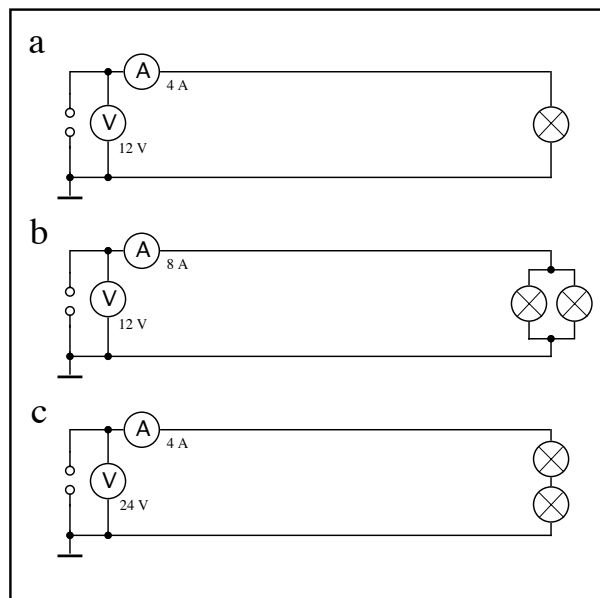


Fig. 17.1. A parità di tensione, l'intensità della corrente di energia è proporzionale all'intensità della corrente elettrica, confronta (a) e (b). A parità di intensità di corrente elettrica, l'intensità della corrente di energia è proporzionale alla tensione, confronta (a) e (c).

Così abbiamo metà della relazione che stiamo cercando. Dobbiamo ancora scoprire la relazione tra l'intensità della corrente di energia e la tensione tra i conduttori. A questo scopo confrontiamo le figg. 17.1a e 17.1c. Anche in fig. 17.1c ci sono due lampadine; questa volta però non l'una fianco all'altra, ma una dopo l'altra. Per prima cosa dobbiamo fare in modo che le lampadine brillino come si deve. Dobbiamo fare in modo che a ognuna di loro sia applicata una tensione di 12 V. Per farlo dobbiamo aumentare l'alimentatore a 24 V. (Pensa ai valori del potenziale in fig. 17.1c.) Visto che su ogni lampadina ci sono 12 V, ogni lampadina è attraversata da una corrente di 4 A. Inoltre: il voltmetro indica che la tensione tra i conduttori è di 24 V e l'ampereometro mostra che in ogni conduttore scorre una corrente di 4 A. Ora il confronto con la fig. 17.1a: l'intensità della corrente di energia e la tensione sono raddoppiate, l'intensità della corrente elettrica è la stessa. Concludiamo che, a parità di intensità di corrente elettrica, l'intensità della corrente di energia è proporzionale alla tensione. In simboli:

$$P \sim U \quad \text{per } I = \text{cost} \quad (2)$$

Le relazioni (1) e (2) si possono riassumere in:

$$P \sim U \cdot I \quad (3)$$

Che la relazione (3) sia corretta si capisce dal fatto che si trasforma in $P \sim I$ quando U è costante e in $P \sim U$ quando I è costante.

Trasmettendo energia con il portatore elettricità, l'intensità della corrente di energia è direttamente proporzionale all'intensità della corrente elettrica nei conduttori e alla tensione tra i conduttori.

Affinché la relazione (3) diventi un'equazione dobbiamo ancora introdurre una costante di proporzionalità che faccia coincidere le unità di misura della parte sinistra e della parte destra. Quindi potremmo scrivere:

$$P = k \cdot U \cdot I$$

Fortunatamente le unità di misura elettriche sono state definite in modo tale che $k = 1$. Non c'è bisogno di nessuna costante di proporzionalità:

$$P = U \cdot I \quad (4)$$

L'intensità della corrente di energia è in watt se la tensione viene data in volt e l'intensità della corrente elettrica in ampere.

Per le unità di misura l'equazione (4) ci dice:

$$W = V \cdot A.$$

L'equazione (4) è una delle formule più importanti di tutta l'elettrologia. Se si conoscono i valori di due delle tre grandezze P , U e I , è possibile calcolare il valore della terza.

Esempio:

Un fusibile di sicurezza interrompe la corrente elettrica appena l'intensità supera i 16 A. Quanta energia al secondo possiamo estrarre al massimo dalla presa di corrente?

Con $I = 16$ A e $U = 220$ V, dalla formula (4) otteniamo

$$P = 220 \text{ V} \cdot 16 \text{ A} = 3520 \text{ W}.$$

Due termoventilatori da 2000 W non potrebbero funzionare contemporaneamente.

Ora possiamo capire anche il significato delle indicazioni riportate sugli apparecchi elettrici. Sulla lampadina in fig. 17.2 si legge "220 V/75 W".

Cominciamo dal "220 V": vuol dire che la lampadina genera una tensione di 220 V? Per niente. A essere sinceri è solo una raccomandazione. Si raccomanda di utilizzare la lampadina a una tensione di 220 V. Naturalmente nessuno ci può impedire di allacciarla a una sorgente con una tensione più bassa. In quel caso però la luce emessa dalla lampadina non sarà più bianca ma più o meno rossiccia. E non possiamo allacciarla a una sorgente con una tensione maggiore. La durata della lampadina si ridurrebbe drasticamente.

E cosa significa l'indicazione "75 W"? Che attraverso il cavo una corrente di energia di 75 W giunge alla lampadina - se operiamo alla tensione raccomandata. A tensioni maggiori la corrente di energia sarà più intensa, a tensioni minori sarà meno intensa.

L'equazione (4) ci dice anche come misurare l'intensità della corrente di energia trasmessa con un cavo a doppio conduttore (quando il portatore è l'elettricità): misuriamo l'intensità della corrente elettrica in un conduttore del cavo (è uguale all'intensità della corrente elettrica nell'altro conduttore) e misuriamo la tensione tra i conduttori. Il prodotto dei valori misurati è l'intensità della corrente di energia.

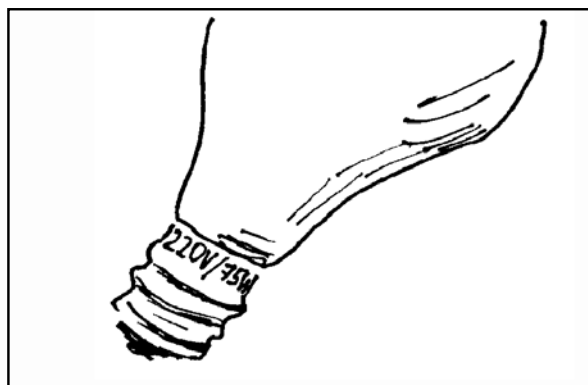


Fig. 17.2. Cosa significa la scritta "220 V/75 W"?

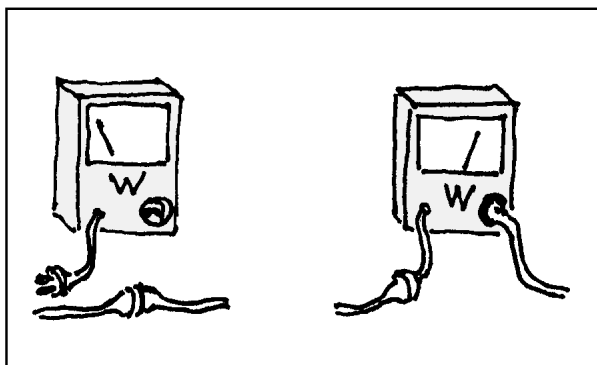


Fig. 17.3. Come misurare l'intensità della corrente di energia in un cavo a doppio conduttore.

Ci sono apparecchi che misurano direttamente l'intensità della corrente di energia, i *wattmetri*. Un wattmetro ha un'entrata e un'uscita per un cavo a doppio conduttore. la misurazione avviene come per altre misurazioni di intensità di corrente: interrompere il cavo a doppio conduttore e allacciare le due estremità ottenute con l'entrata e l'uscita dell'apparecchio, fig. 17.3.

Esercizi

1. Una lampadina per un faro d'automobile è allacciata alla batteria da 12 V dell'auto. Scorre una corrente elettrica di intensità 3,75 A. Qual è l'intensità della corrente di energia che scorre dalla batteria alla lampadina?

2. Su una lampadina si può leggere "12 V/21 W". Qual è l'intensità della corrente elettrica quando la lampadina è accesa?

3. La fig. 17.4a mostra due lampadine collegate a un alimentatore. Calcola i valori indicati dai tre apparecchi di misurazione.

(a) l'intensità della corrente di energia che esce dalla sorgente di energia;

(b) l'intensità della corrente di energia che fluisce nella lampadina L1;

(c) l'intensità della corrente di energia che fluisce nella lampadina L2.

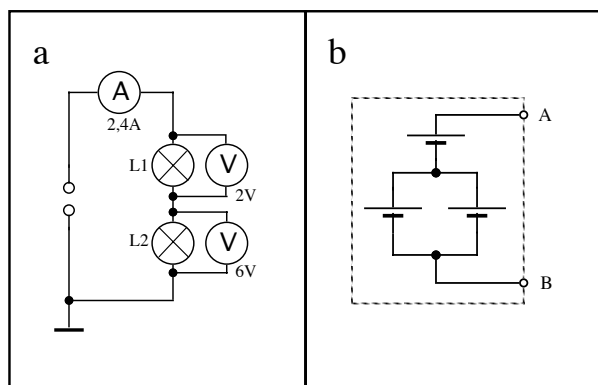


Fig. 17.4. (a) Per l'esercizio 3; (b) per l'esercizio 6

4. Due motori collegati in parallelo sono alimentati da una batteria da 12 V. Il motore 1 è attraversato da una corrente elettrica di 2 A, il motore 2 da una corrente di 3 A.

(a) Quanta energia cede la batteria al secondo?

(b) Che intensità hanno le correnti di energia che affluiscono al motore 1 e al motore 2?

5. Una batteria da 12 V e una batteria da 9 V sono collegate in serie. Viene allacciato un motore elettrico, la corrente che lo attraversa è di 1,5 A. Qual è l'intensità della corrente di energia che affluisce al motore? Quanti J al secondo cede la batteria da 12 V e quanti la batteria da 9 V?

6. Tre pile sono montate in una sorgente di energia, come mostrato in fig. 17.4b. Che tensione c'è tra A e B? Ai poli A e B viene allacciato un consumatore di energia. La corrente elettrica risultante è di 10 mA. Quale delle tre pile si svuota per prima? Quanti joule al secondo vengono ceduti dalla sorgente? Quanti ne cede ognuna delle tre pile?

7. La sorgente di energia di una radio a transistor è formata da tre pile in serie. Quando la radio è accesa la corrente elettrica ha un'intensità media di 60 mA. Ogni pila ha un contenuto di energia di 20 kJ.

(a) Qual è l'intensità della corrente elettrica che esce dalle pile?

(b) Quanto tempo può funzionare la radio con un set di pile?

8. Riporta sotto forma di lista il consumo energetico di vari apparecchi elettrici che trovi per casa. Per quali un risparmio di energia sarebbe particolarmente vantaggioso?

9. Un resistore da 2 k Ω viene allacciato a un alimentatore da 80 V. Qual è l'intensità della corrente elettrica che scorre attraverso il resistore? Qual è l'intensità della corrente di energia che scorre attraverso il resistore?

10. La resistenza R in fig. 17.5 ha un valore di 2 Ω . L'ampereometro indica 10 A. Nella lampadina L scorre una corrente di energia di 100 W.

(a) Quanto vale la tensione generata dalla batteria?

(b) Qual è l'intensità della corrente elettrica che attraversa la lampadina?

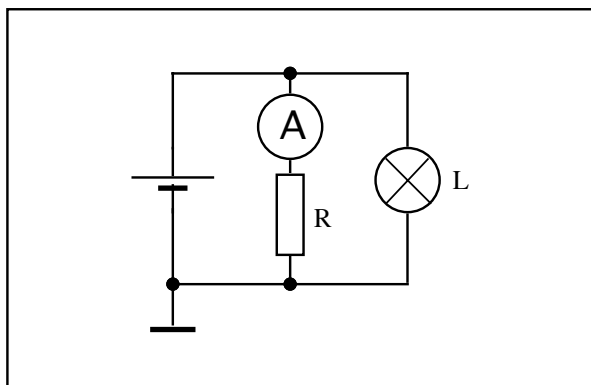


Fig. 17.5. Per l'esercizio 10

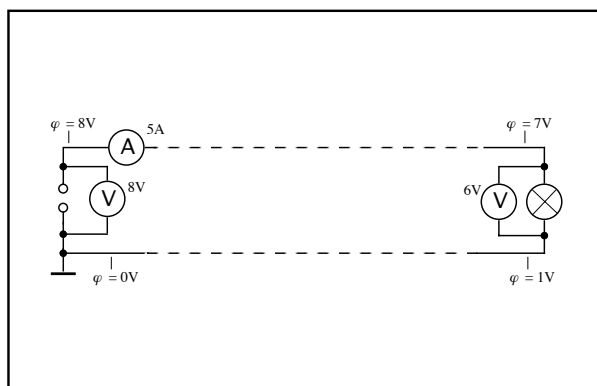


Fig. 17.6. La lampadina ha una tensione inferiore all'alimentatore. Ci vogliono 2 volt per spingere l'elettricità attraverso il lungo conduttore

17.2 La resistenza dei conduttori - Perdite di energia nei conduttori

Una lampadina da 6 V è allacciata a un alimentatore mediante un cavo molto lungo, fig. 17.6. Inizialmente la tensione è posta a 0 V. Aumentiamo progressivamente la tensione all'alimentatore fino a quando il voltmetro della lampadina indica 6 V. Ora la tensione ha il valore corretto e la lampadina brilla come si deve. L'amperometro indica che stanno scorrendo 5 A. Visto che si tratta di un circuito semplice, non ramificato, la corrente deve essere la stessa in ogni punto del circuito.

Ma c'è una cosa curiosa. Il voltmetro di sinistra, che misura la tensione tra i collegamenti dell'alimentatore, indica 8 V e non i 6 V che in effetti ci saremmo aspettati. Come è possibile? Finora avevamo sempre presupposto che tutti i punti di uno stesso conduttore si trovassero allo stesso potenziale. Evidentemente questa supposizione è errata. Se il potenziale di entrambi i fili fosse lo stesso a sinistra e a destra, anche la differenza di potenziale tra i due fili dovrebbe essere la stessa a sinistra e a destra.

Visto che nel capitolo precedente abbiamo imparato qualcosa sulla resistenza dei fili, siamo in grado di spiegare questa stranezza: la corrente di 5 A che scorre in ogni punto del circuito non ha bisogno di una spinta solo per superare la resistenza della lampadina: ha bisogno di una spinta anche per attraversare i fili del conduttore. I due conduttori e la lampadina si devono spartire gli 8 V forniti dall'alimentatore. La lampadina ha bisogno, come sappiamo, di una differenza di potenziale di 6 V. Restano così 2 V per far passare la corrente attraverso i cavi. Visto che i due conduttori verso e dalla lampadina sono lunghi uguali, la spinta richiesta è la stessa. Quindi in entrambi i conduttori la corrente è spinta da una tensione di 1 V. Tra l'inizio e la fine dei due conduttori c'è una differenza di potenziale di 1 V. In fig. 17.6 sono indicati i valori di potenziale in quattro diversi punti del circuito.

La resistenza dei conduttori è particolarmente indesiderata. Perché? È la causa della perdite di energia, quindi costa denaro.

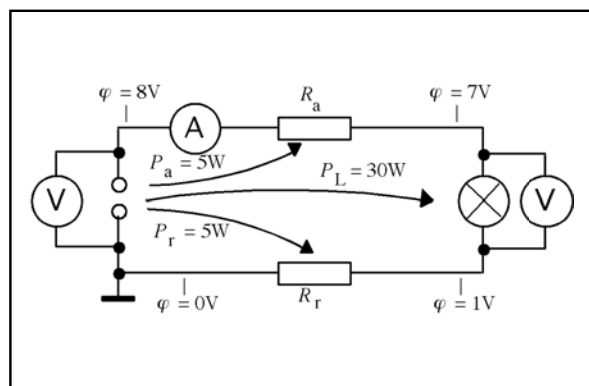


Fig. 17.7. Schema elettrico equivalente al circuito in fig. 17.6. I conduttori sono sostituiti dai simboli per la resistenza.

Vogliamo calcolare la perdita di energia del circuito in fig. 17.6. Possiamo immaginare il circuito come composto da tre ricevitori di energia allacciati in serie. La fig. 17.7 mostra il cosiddetto schema elettrico equivalente. I due conduttori (andata e ritorno) sono sostituiti da due resistenze: R_a e R_r . A questo punto possiamo considerare i conduttori disegnati in fig. 17.7 come privi di resistenza; le resistenze dei conduttori sono già incluse in R_a e R_r . I potenziali dei vari tratti di conduttore sono indicati nella figura.

A ognuno dei tre "apparecchi" (la lampadina, la resistenza R_a e la resistenza R_r) affluisce una corrente di energia. Calcoliamo le tre intensità di corrente P_L , P_a e P_r secondo l'equazione $P = U \cdot I$.

L'intensità della corrente elettrica è la stessa per tutti e tre i componenti, cioè 5 A. La tensione tra le estremità del conduttore di andata è

$$U_a = 8 \text{ V} - 7 \text{ V} = 1 \text{ V},$$

quella tra le estremità del conduttore di ritorno

$$U_r = 1 \text{ V} - 0 \text{ V} = 1 \text{ V}$$

e la tensione tra i collegamenti della lampadina

$$U_L = 7 \text{ V} - 1 \text{ V} = 6 \text{ V}.$$

Quindi per le intensità delle correnti di energia otteniamo

$$P_a = 1 \text{ V} \cdot 5 \text{ A} = 5 \text{ W}$$

$$P_r = 1 \text{ V} \cdot 5 \text{ A} = 5 \text{ W}$$

$$P_L = 6 \text{ V} \cdot 5 \text{ A} = 30 \text{ W}.$$

Quei 5 W + 5 W = 10 W che scorrono nelle resistenze R_a e R_r , cioè nei conduttori, hanno come effetto il riscaldamento dei conduttori. Per noi questi 10 W sono persi. Rappresentano la *corrente di perdita di energia*. Quindi

$$P_{\text{perdita}} = 10 \text{ W}.$$

Tra l'altro, con l'equazione

$$R = U/I$$

possiamo calcolare facilmente la resistenza dei conduttori. Con

$$U_a = U_r = 1 \text{ V}$$

e

$$I = 5 \text{ V}$$

si ottiene

$$R_a = R_r = 0,2 \text{ } \Omega.$$

Ognuno dei due fili ha una resistenza di $0,2 \text{ } \Omega$.

Esercizi

1. Un grosso motore è allacciato a una sorgente di 200 V con un cavo molto lungo. Ogni conduttore del cavo ha una resistenza di $0,5 \text{ } \Omega$. Nei conduttori scorre una corrente elettrica di 8 A .

- Qual è l'intensità della corrente di energia che lascia la sorgente?
- Qual è la perdita nei conduttori?
- Quanti joule al secondo arrivano al motore?

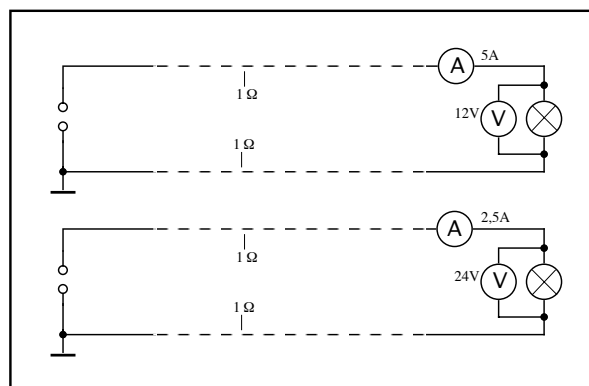


Fig. 17.8. La quantità di energia che fluisce nella lampadina è la stessa in entrambi i casi. Le perdite però sono diverse.

2. La fig. 17.8 mostra due dispositivi nei quali una lampadina riceve energia da un alimentatore mediante un lungo cavo. Entrambe le lampadine sono da 60 W . Quella in fig. 17.8a necessita di una tensione di 12 V . Quindi la corrente elettrica sarà di 5 A . La lampadina di fig. 17.8b ha bisogno di 24 V . La corrente elettrica sarà di $2,5 \text{ A}$. Ogni conduttore ha una resistenza di $1 \text{ } \Omega$. Calcola per ogni dispositivo

- la tensione tra le estremità dei conduttori;
- la tensione tra i collegamenti dell'alimentatore;
- la perdita di energia.

Confronta le perdite nei due dispositivi. Formula una regola.

18. Il campo magnetico

18.1 Alcuni semplici esperimenti con aghi e magneti

I magneti possono attrarsi o respingersi. L'attrazione rispettivamente repulsione avviene ai cosiddetti *poli*.

Prendiamo un magnete a forma di sbarra che abbia i poli alle estremità, appendiamolo con un filo sottile in modo che stia in posizione orizzontale e che possa ruotare facilmente e vedremo il magnete orientarsi in direzione nord-sud. Uno dei poli punta verso nord, l'altro verso sud. Quindi ci devono essere due tipi di polo. Chiamiamo polo nord quello che nel nostro esperimento punta verso nord, l'altro lo chiamiamo polo sud.

La maggior parte dei magneti ha un solo polo nord e un solo polo sud. Altri hanno più poli, per esempio due poli nord e due sud. Magnet con un solo polo, per esempio un polo nord, non esistono. In fig. 18.1 puoi vedere tre diversi magneti.

L'attrazione tra due poli magnetici avviene solo quando uno dei due è un polo nord e l'altro un polo sud. La repulsione si osserva tra poli "omonimi", cioè tra due poli nord o due poli sud, fig. 18.2. L'attrazione e la repulsione sono tanto più intense quanto più vicini sono i poli.

I poli omonimi si respingono, i poli di nome diverso si attraggono.

Le constatazioni fatte finora riguardano solo il comportamento di un magnete in presenza di un altro

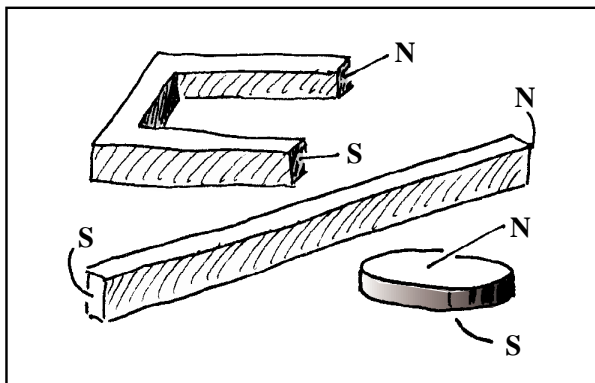


Fig. 18.1. Magnet a ferro di cavallo, magnete a sbarra, pastiglia magnetica.

magnete. Ci sono però dei fenomeni che, pur essendo imparentati con quelli già discussi, si differenziano per un aspetto essenziale, fig. 18.3: un magnete attira oggetti di ferro, come chiodi o puntine da disegno. Li attira, non li respinge mai. Questo comportamento non è in contraddizione con la frase in grassetto, al contrario la si può usare per spiegarlo. Anche il fatto che un chiodo venga attratto da un magnete dipende dall'attrazione tra poli opposti: il chiodo stesso diventa un magnete appena viene avvicinato a un polo magnetico. Se avviciniamo il chiodo per esempio al polo nord, fig. 18.4a, all'estremità del chiodo rivolta verso il polo nord si forma un polo sud. All'altra estremità del chiodo si forma un polo nord. Ora è chiaro che il chiodo verrà attratto dal polo nord del magnete.

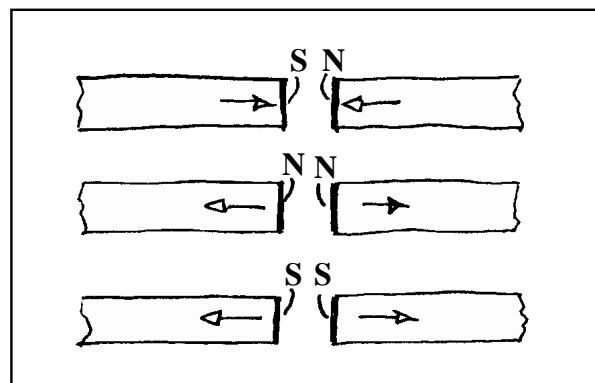


Fig. 18.2. I poli opposti si attraggono, i poli uguali si respingono.

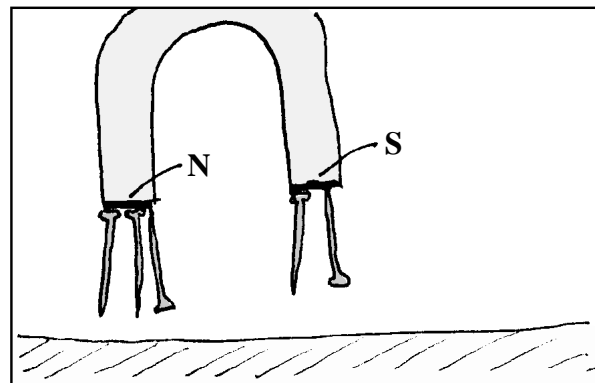


Fig. 18.3. Gli oggetti di ferro dolce sono sempre attratti da un magnete, mai respinti.

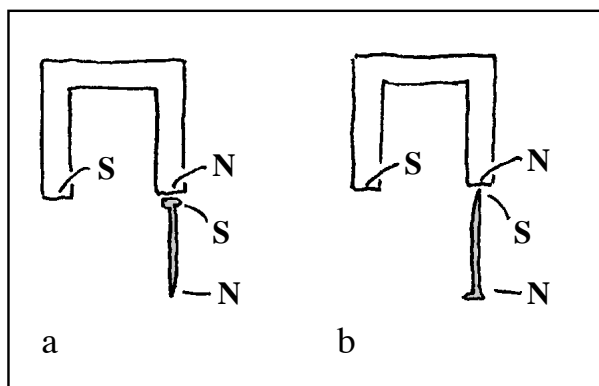


Fig. 18.4. Sull'estremità del chiodo rivolta verso il magnete si forma un polo positivo.

Se giriamo il chiodo, fig. 18.4b, il polo sud si forma nuovamente all'estremità rivolta verso il polo nord del magnete, quindi sulla punta, mentre l'altra estremità, la testa, diventa il polo nord.

Se lo allontaniamo dal magnete, il chiodo perde i suoi poli.

Possiamo capire anche il fenomeno in fig. 18.5. Il secondo chiodo è appeso al polo nord appena formato sulla punta del primo chiodo.

Per sottolineare il fatto che un magnete "vero" non perde i suoi poli facilmente come un chiodo, viene chiamato anche *magnete permanente*. Il chiodo non è un magnete permanente.

Generare poli magnetici in un oggetto si dice *magnetizzare*. Quando avviciniamo un chiodo a un magnete permanente, lo magnetizziamo. Un magnete permanente è già stato magnetizzato in precedenza dal fabbricante.

Materiali come il ferro, di cui è fatto il chiodo, vengono detti *magnetici dolci*. I materiali magnetici dolci si magnetizzano appena li si avvicina a un magnete. Si lasciano magnetizzare molto facilmente ma perdono il loro magnetismo non appena li si allontana dal magnete.

I magneti permanenti sono fatti da materiali *magnetici duri*.

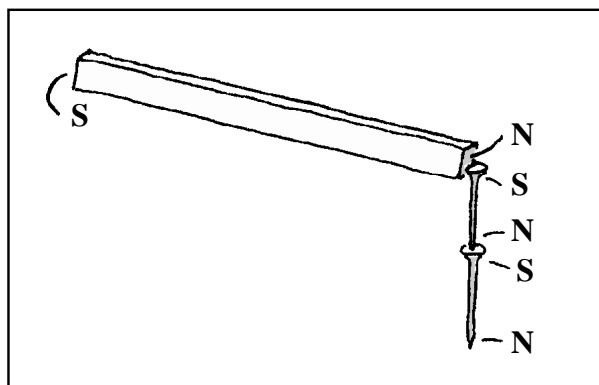


Fig. 18.5. Il chiodo inferiore è appeso per il suo polo positivo al polo negativo dell'altro chiodo.

Anche i materiali magnetici duri possono perdere il loro magnetismo. Si deve usare un po' di "violenza". Un magnete permanente riscaldato fino a una temperatura di ca. 800 °C perde il suo magnetismo. I poli magnetici scompaiono e non riappaiono nemmeno se il magnete viene nuovamente raffreddato. Puoi provare anche tu, nel caso tu abbia un magnete di cui puoi fare a meno.

Un tipico materiale magnetico dolce è il "ferro dolce". Si tratta di una qualità di ferro usata per esempio per fare i chiodi. I materiali magnetici duri hanno una composizione più complessa. Di solito anche loro contengono ferro.

Ci sono anche sostanze con caratteristiche intermedie tra i due estremi. Per esempio l'acciaio. Anche in un pezzo d'acciaio si formano dei poli magnetici non appena viene avvicinato a un altro magnete. Però quando lo allontaniamo i poli non spariscono del tutto.

Quindi l'acciaio può essere magnetizzato permanentemente, vale a dire trasformato in un magnete. Puoi provare anche tu, per esempio con un ferro da calza in acciaio. La magnetizzazione è particolarmente efficace se strofini un magnete intenso sul ferro, scorrendo sempre nella stessa direzione.

Questo effetto viene sfruttato per immagazzinare dati, per esempio in una cassetta audio, una videocassetta, i dischetti per computer e le carte di credito. Sul supporto, cioè il nastro o il disco, c'è un sottile strato di un materiale che si lascia magnetizzare facilmente e poi mantiene il suo magnetismo. I dati vengono registrati magnetizzando lo strato sul supporto.

Esercizio

Qualcuno sostiene che ci sono quattro tipi di polo magnetico. Ti dà due magneti: uno normale con un polo nord e un polo sud e un altro che dovrebbe avere un polo A e un polo B. Che esperimento puoi fare per dimostrargli l'infondatezza della sua affermazione?

18.2 Poli magnetici

Le affermazioni fatte finora riguardo i poli magnetici erano ancora abbastanza vaghe. Dove sono esattamente i poli su un magnete? Dove cominciano e dove finiscono?

Facciamo un esperimento molto semplice con due magneti a ferro di cavallo assolutamente identici. Prima solleviamo un pesante pezzo di ferro con uno dei magneti, fig. 18.6. Poi uniamo i due magneti in modo che il polo sud dell'uno tocchi il polo nord dell'altro e viceversa, fig. 18.7. Ora proviamo a sollevare il pezzo di ferro con l'anello appena formato. Non funziona, il ferro non resta appeso. L'effetto dei poli è quindi sparito. Possiamo anche dire che i poli sono scomparsi, si sono "annullati" a vicenda.

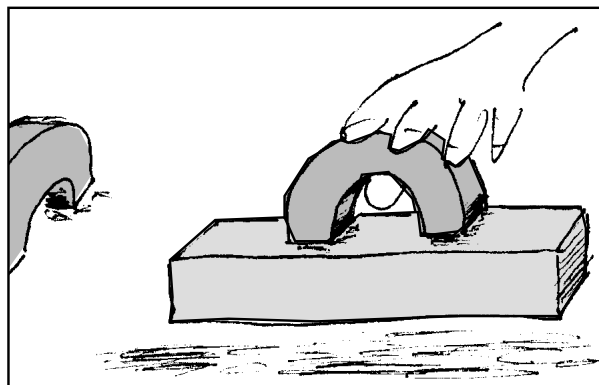


Fig. 18.6. Con uno solo dei magneti è possibile sollevare il pezzo di ferro.

Descriviamo l'osservazione in modo ancora più accurato. Nei poli di un magnete c'è qualcosa che chiameremo *carica magnetica*. Questa carica magnetica si trova sulla superficie del magnete, nel caso dei magneti a ferro di cavallo di fig. 18.6 sulle superfici terminali.

Dalla constatazione che la carica magnetica del polo sud e la carica magnetica del polo nord si annullano, concludiamo che la carica magnetica si presenta con due possibilità di segno. Quale delle due, carica nord e carica sud, viene definita positiva e quale negativa non è importante. Si deve solo decidere una volta per tutte. Si è deciso arbitrariamente (ma in coerenza con la carica elettrica) di definire positiva la carica del polo nord e negativa la carica del polo sud.

Se uniamo le stesse quantità di carica magnetica positiva e negativa, la carica totale risultante è nulla, le cariche magnetiche positiva e negativa si sono annullate a vicenda. (È come se tu avessi contemporaneamente 100 € di debito e 100 € di credito. Nel complesso avresti 0 €.)

Ora l'esperimento di fig. 18.7 si può spiegare facilmente: in ognuna delle superfici di contatto dei magneti c'è la stessa quantità di carica magnetica positiva e negativa.

Da questo esperimento possiamo trarre anche un'altra conclusione: un unico magnete contiene la stessa quantità di carica magnetica positiva e negativa.

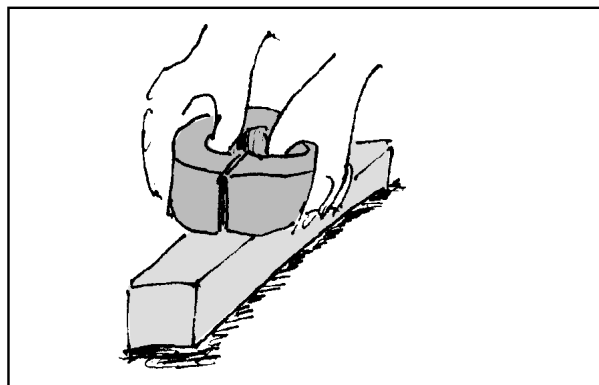


Fig. 18.7. I due magneti formano un anello. Il pezzo di ferro non resta appeso a questo anello.

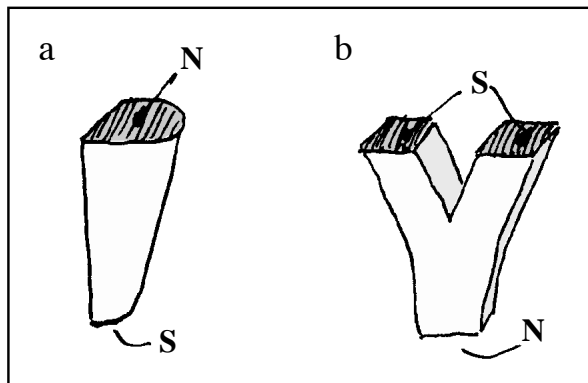


Fig. 18.8. Anche per questi magneti particolari la carica magnetica positiva equivale alla carica magnetica negativa.

Un magnete contiene la stessa quantità di carica magnetica positiva e negativa.

Questa affermazione vale per tutti i magneti, anche per quello molto asimmetrico in fig. 18.8a. La carica magnetica si trova sulle estremità. Visto che il polo nord ha una superficie maggiore del polo sud, la carica magnetica dalla parte del polo sud deve essere più concentrata. La fig. 18.8b mostra un altro magnete un po' particolare: ha un polo nord ma due poli sud. Ancora una volta però, la carica del polo nord è equivalente alla carica del polo sud.

18.3 Linee di magnetizzazione

A questo punto possiamo capire un altro fenomeno: se spezziamo un magnete a sbarra si formano due nuovi poli magnetici, fig. 18.9. Possiamo continuare a spezzare i pezzi ottenuti: otterremo sempre dei magneti completi, ogni pezzetto avrà la stessa quantità di carica del polo nord e di carica del polo sud.

Se spezziamo un pezzo d'acciaio non magnetizzato, nel punto di rottura non c'è carica magnetica. Se invece spezziamo un pezzo d'acciaio magnetizzato otteniamo dei poli. Concludiamo che durante la magnetizzazione di un pezzo di ferro *tutto* il pezzo viene modificato e non solo i punti dove si trovano i poli.

Come ogni altra sostanza, anche il ferro è composto da particelle piccolissime, gli atomi. Nel ferro ogni

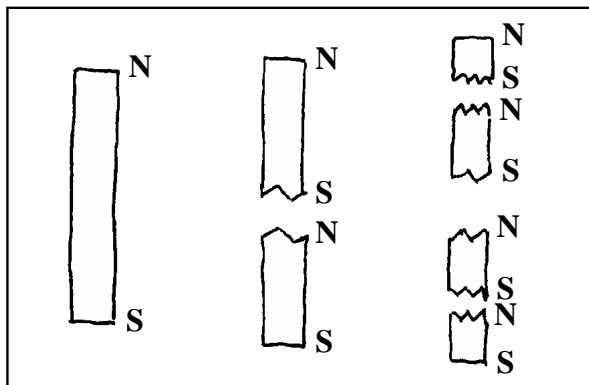


Fig. 18.9. Se spezziamo un magnete a sbarra, nel punto di rottura si formano due nuovi poli.

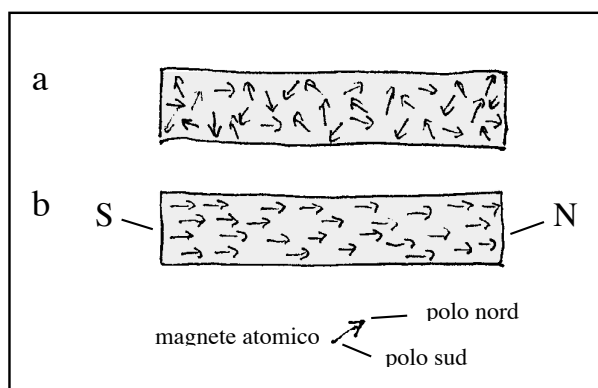


Fig. 18.10. (a) In un pezzo di ferro non magnetizzato i magnetini atomici hanno direzioni diverse. (b) In un pezzo di ferro magnetizzato i magnetini atomici sono allineati. All'estremità sinistra del magnete si forma un polo positivo, all'estremità destra un polo negativo.

atomo è magnetico, cioè ogni atomo è un piccolissimo magnete. Fintantoché il ferro non è magnetizzato i magnetini atomici sono orientati in tutte le direzioni. Il risultato è che il ferro nel complesso non mostra nessuna magnetizzazione, fig. 18.10a. Gli effetti dei singoli magnetini si annullano a vicenda.

Invece in un magnete permanente, o in un pezzo di ferro dolce magnetizzato, i magnetini atomici sono orientati con regolarità, come in fig. 18.10b. Il risultato è che all'estremità sinistra del magnete c'è solo carica del polo sud (carica magnetica negativa) e all'estremità destra solo carica del polo nord (carica magnetica positiva).

La fig. 18.10b mostra pure come rappresentare graficamente lo stato di magnetizzazione di un oggetto. Possiamo migliorare ulteriormente la rappresentazione. Invece di indicare i magnetini atomici con delle frecce tracciamo delle linee, le *linee di magnetizzazione*. Le tracciamo in modo che la loro direzione rifletta l'orientamento dei magnetini atomici. Aggiungiamo a ogni linea una freccia in modo che la direzione vada dal polo sud al polo nord, fig. 18.11a.

Le linee di magnetizzazione descrivono lo stato di magnetizzazione della materia. Cominciano dalla carica magnetica negativa (carica del polo

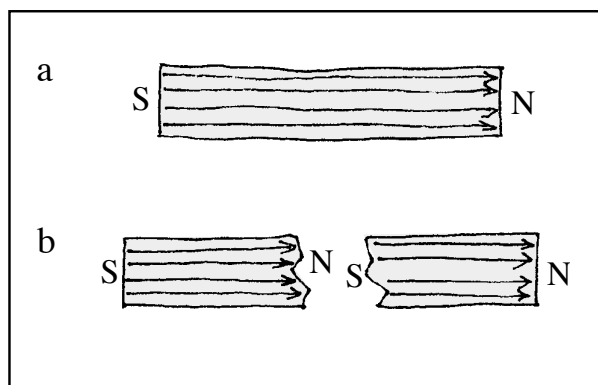


Fig. 18.11. (a) Rappresentazione grafica della stato di magnetizzazione con l'aiuto delle linee di magnetizzazione. (b) Spezzando un magnete si formano nuovi poli.

sud) e finiscono alla carica magnetica positiva (carica del polo nord).

Il diagramma delle linee di magnetizzazione è estremamente informativo. Ci dice dove si trova esattamente la carica magnetica in un magnete: dove iniziano le linee c'è carica negativa, dove terminano c'è carica positiva. Ci dice anche cosa succede se spezziamo un magnete. Ad esempio, se spezziamo il magnete in fig. 18.11a come mostrato in fig. 18.11b, all'estremità destra del pezzo di sinistra le linee di magnetizzazione finiscono. Quindi qui c'è un nuovo polo nord. All'estremità sinistra del pezzo di destra iniziano delle linee di magnetizzazione. Quindi qui c'è un nuovo polo sud.

Un pezzo di ferro può essere magnetizzato nei modi più disparati. Consideriamo un magnete dalla forma inusuale, fig. 18.12a. La fig. 18.12b mostra in che modo è stato magnetizzato durante la produzione. Le linee di magnetizzazione ci dicono cosa succede se rompiamo il magnete. Nel punto di rottura superiore si formano dei poli, in quello inferiore no, fig. 18.12c.

Avrai notato che dalle linee di magnetizzazione possiamo dedurre la posizione dei poli. Si può fare anche il contrario? Possiamo tracciare le linee di magnetizzazione conoscendo la posizione dei poli? Consideriamo la fig. 18.13a. Il magnete ha 4 poli, tutti sulla stessa faccia. Come sono le linee di magnetizzazione? Ti renderai conto che ci sono svariate soluzioni: magneti con i poli come quelli mostrati

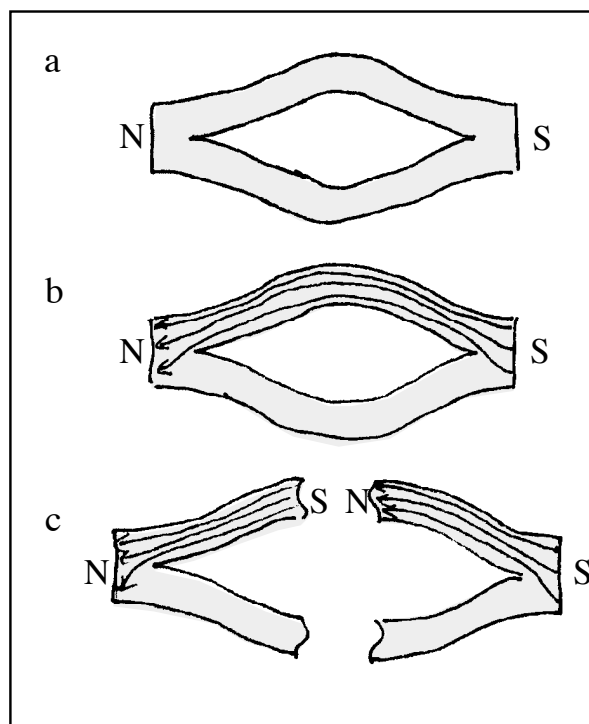


Fig. 18.12. (a) Un magnete di forma particolare. (b) Dal-l'esterno non si vede che le linee di magnetizzazione passano solo per il braccio superiore. (c) Quando il magnete viene spezzato, nel braccio superiore si formano dei poli, in quello inferiore no.

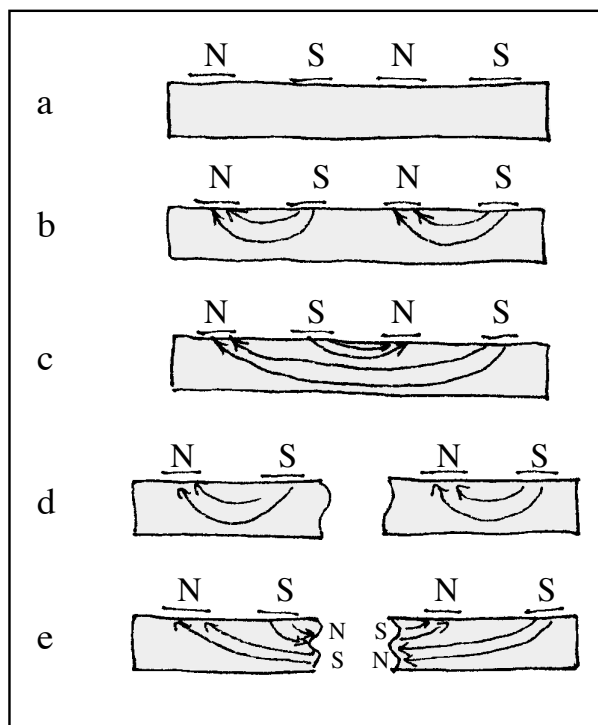


Fig. 18.13. (a) Un magnete con 4 poli su un lato. (b) e (c) Due possibili magnetizzazioni. (d) e (e) La differenza tra (b) e (c) si nota spezzando il magnete a metà.

in fig. 18.12a possono essere prodotto in modi diversi. Le figg. 18.13b e 18.13c mostrano due possibilità. L'effettiva magnetizzazione del magnete non si vede dall'esterno. Un metodo per distinguere le due possibilità consisterebbe nello spezzare il magnete. Rompendo il magnete in fig. 18.13b non si formano nuovi poli, fig. 18.13d. Invece rompendo il magnete in fig. 18.13c si formano un polo sud e un polo nord su ognuno dei due punti di rottura, fig. 18.13e.

Esercizi

1. Come potrebbero essere le linee di magnetizzazione di un magnete a ferro di cavallo?
2. Come potrebbero essere le linee di magnetizzazione nel magnete in fig. 18.14a?
3. Come potrebbero essere le linee di magnetizzazione nel magnete in fig. 18.14b? Dai due soluzioni.
4. Su un magnete a forma di dischetto cilindrico ci sono 3 poli nord e 3 poli sud. Tutti i poli sono sulla superficie laterale del cilindro, i poli sud e nord si alternano e sono distribuiti uniformemente lungo la circonferenza. Come potrebbero essere le linee di magnetizzazione del cilindro? Dai due soluzioni.
5. Qualcuno ti dà un anello d'acciaio affermando che l'anello è magnetizzato e che le linee di magnetizzazione seguono la forma dell'anello, quindi sono circolari. Di conseguenza il magnete non ha poli. Come puoi verificare se l'affermazione è vera?

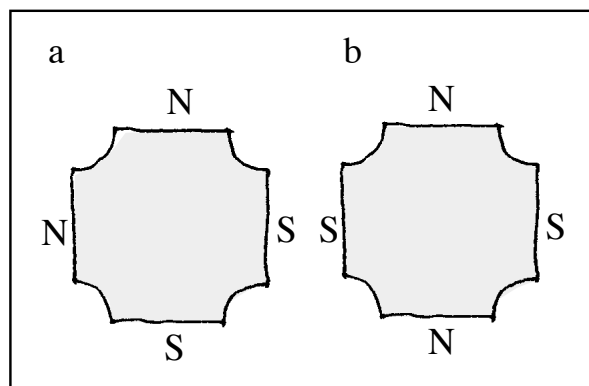


Fig. 18.14. Per gli esercizi 2 e 3. Come sono le linee di magnetizzazione?

18.4 Il campo magnetico

Occupiamoci per un po' di un altro problema. I due vagoni in fig. 18.15a si avvicinano perché la persona tira la corda. I due vagoni in fig. 18.15b si allontanano spinti dalla molla. La fig. 18.15c mostra due pistoni in un cilindro. Qualcuno spinge il pistone di sinistra, il pistone di destra si muove.

Le tre situazioni in fig. 18.15 hanno una cosa in comune: ogni volta c'è un corpo che si mette in moto a spese di un altro. (Un corpo riceve quantità di moto dall'altro.)

Per il momento ci preme fare la seguente constatazione: affinché un corpo A possa spingere o tirare un corpo B, tra A e B ci deve essere un collegamento. (Affinché la quantità di moto possa scorrere da A a B o da B ad A, ci deve essere un collegamento.)

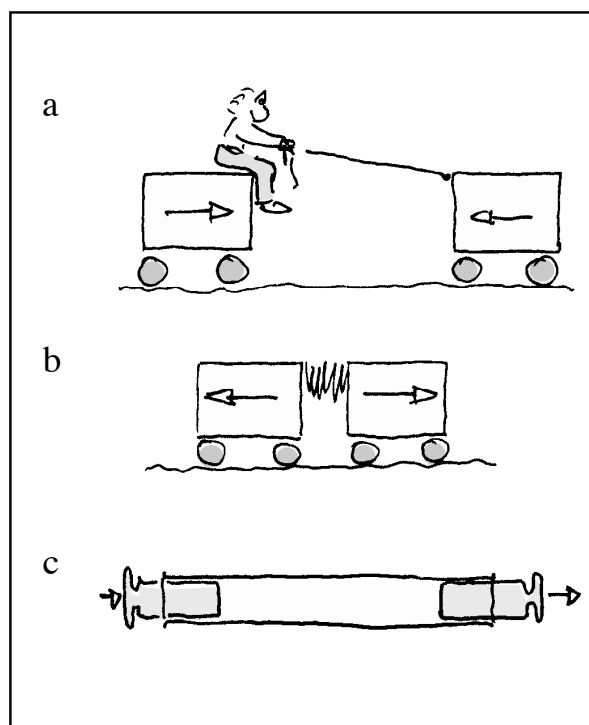


Fig. 18.15. I due vagoni in figura a sono collegati da una corda, quelli in figura b sono collegati da una molla e quelli in figura c dall'aria.

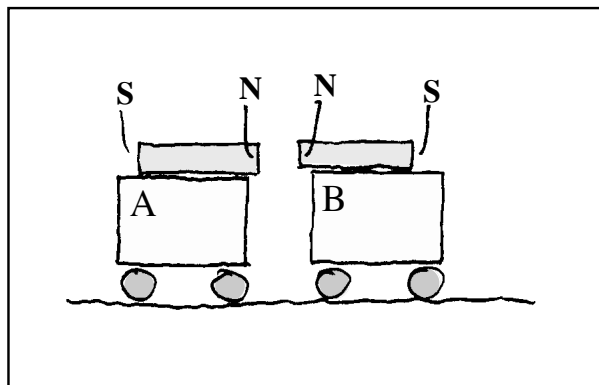


Fig. 18.16. I due magneti sono collegati attraverso il loro campo magnetico.

Nel primo esempio in fig. 18.15 il collegamento è la corda, nel secondo la molla e nel terzo l'aria nel cilindro.

Se un oggetto ne spinge o ne trascina un altro, tra gli oggetti ci deve essere un collegamento.

Torniamo al magnetismo: su due carrelli vengono montati dei magneti, fig. 18.16, e il carrello A viene spinto verso il carrello B. Prima ancora che i carrelli o i magneti si tocchino, il carrello B si mette in moto.

Ovvio, dirai tu. Della questione ci siamo già occupati a fondo. Il polo nord di sinistra respinge il polo nord di destra. Ma se prendiamo seriamente la frase scritta in grassetto possiamo trarre una nuova conclusione: tra i due poli nord in fig. 18.16 ci deve essere un collegamento, collegamento mediante il quale il polo nord di sinistra agisce su quello di destra. È evidente che questo collegamento non è visibile (tra l'altro come l'aria in fig. 18.15c). La cosa che collega i due poli nord in fig. 18.16 viene chiamata *campo magnetico*.

Prendi due magneti, avvicina i poli omonimi e premili l'uno contro l'altro. Percepirai il campo magnetico che tenta di mantenere separati i poli.

Il campo magnetico è distribuito intorno a entrambi i poli di un magnete. Se avviciniamo due poli di due magneti diversi, il campo magnetico tra i poli si comporta come una molla elastica.

Così come una molla può attrarre o respingere, anche il campo può attrarre o respingere. Quindi non ci sono due diversi tipi di campo. Dopo aver letto il prossimo paragrafo capirai meglio come mai il campo magnetico a volte attira e a volte respinge.

Per il momento il campo ci è utile per riformulare una vecchia regola. Prima avevamo detto: "I poli uguali si respingono, i poli opposti si attraggono." Guarda di nuovo la situazione in fig. 18.15b. Diresti che i vagoni si respingono? Certo che no. È più corretto dire: "la molla allontana i due vagoni". Analogamente vogliamo riformulare la nostra regola sui magneti:

I poli uguali sono respinti dai loro rispettivi campi, i poli opposti sono attratti.

18.5 La rappresentazione grafica dei campi magnetici

L'effetto di un campo magnetico associato a un polo diminuisce con la distanza, cioè allontanandosi dal polo. Dipende dal fatto che il campo è più denso in prossimità del polo; allontanandosi la sua densità diminuisce - come la densità dell'aria sopra la superficie terrestre diminuisce con l'altitudine. Quindi non possiamo dire che il campo agisce fino a una determinata distanza dal polo. Il campo non ha un bordo, non ha un confine netto - esattamente come l'aria sopra la superficie della Terra non ha un limite netto.

Se vogliamo rappresentare graficamente il campo magnetico, possiamo sottolineare la variazione di densità disegnandolo in grigio scuro nei pressi del polo e schiarendo progressivamente la tonalità di grigio con l'aumentare della distanza dal polo, fig. 18.17. Un altro metodo consiste nel rappresentare il campo con dei punti, vicini nei pressi del polo e radi più lontano, fig. 18.18.

La rappresentazione è ancora migliorabile. Per rendercene conto dobbiamo compiere qualche esperimento. Avviciniamo a un magnete un ago di bussola, cioè un piccolo magnete libero di ruotare su un supporto. La direzione presa dall'ago dipende dalla posizione in cui lo mettiamo. A ogni punto del campo del magnete più grande corrisponde una direzione. Diciamo anche: il campo del magnete *ha* una certa direzione in ogni punto.

Il fatto di assegnare una direzione a ogni punto di un oggetto massiccio non è poi così strano. Le venature del legno significano che in ogni punto c'è una direzione lungo la quale il legno si fende più facilmente, fig. 18.19. Nel paragrafo precedente abbiamo visto che anche nel ferro ci sono delle direzioni particolari, in particolare quando il ferro è magnetizzato.

È possibile rappresentare in modo molto semplice tutte le direzioni dei vari punti di un campo magnetico. Prendiamo come esempio il campo di un magnete a sbarra.

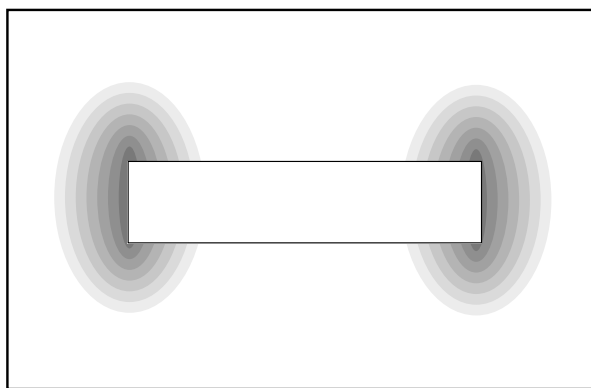


Fig. 18.17. La densità del campo magnetico è espressa dalle diverse tonalità di grigio.

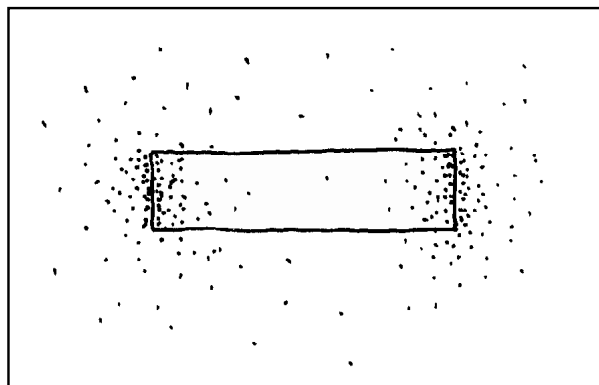


Fig. 18.18. La densità del campo magnetico è espressa dalle diverse densità dei punti.

Appoggiamo sul magnete una lastra di un materiale non magnetizzabile, preferibilmente vetro. La lastra di vetro non influenza il campo. Spargiamo sul vetro un po' di limatura di ferro e diamo qualche colpetto con le dita. Le scaglie formano delle catene. In ogni punto del campo, queste catene indicano la direzione nella quale si sarebbe orientato un ago di bussola. Quindi, in ogni punto indicano la direzione del campo.

Torniamo ora al problema della rappresentazione grafica di un campo. Abbiamo visto che ogni "pezzetto" di campo ha la sua direzione. Per evidenziare queste direzioni in un disegno possiamo procedere come mostrato in fig. 18.20: invece di punti (fig. 18.18) disegniamo delle piccole frecce - molte dove il campo è denso, poche dove è meno denso. Scegliamo la direzione della freccia in modo che sia orientata partendo dal polo nord.

Il metodo delle *linee di campo* è ancora più elegante, fig. 18.21. Invece delle singole frecce di fig. 18.20, tracciamo delle linee continue. La direzione delle linee indica la direzione del campo. La distanza laterale delle linee ci dice quanto è denso il campo. Dove le linee sono più vicine l'una all'altra il campo è più denso, dove le linee sono molto lontane fra loro il campo è meno denso. Anche sulle linee di campo disegniamo una freccia, in modo tale che le linee partano da un polo nord e arrivino a un polo sud.

Come puoi vedere in fig. 18.21:

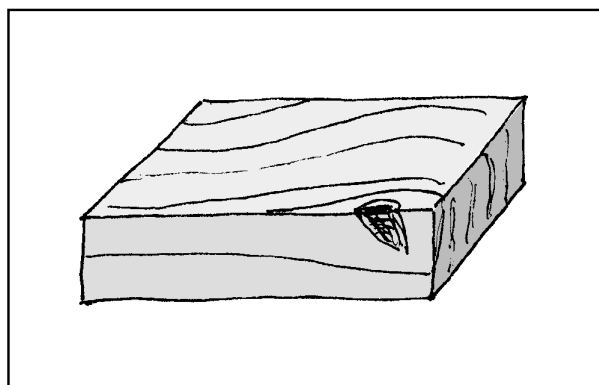


Fig. 18.19. Le venature del legno ci dicono in quale direzione sarà più facile spaccarlo.

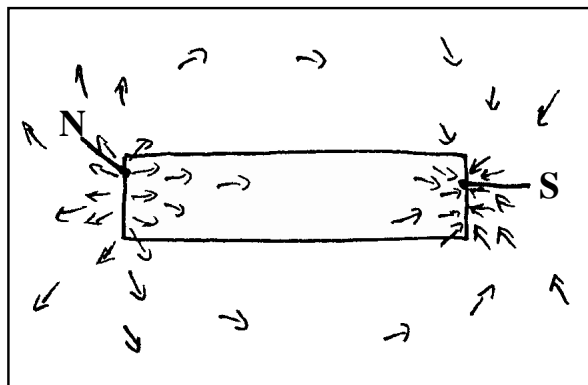


Fig. 18.20. La direzione delle frecce indica la direzione del campo, la loro densità è una misura della densità del campo.

Le linee di campo magnetico cominciano alla carica magnetica positiva (polo nord) e finiscono alla carica magnetica negativa (polo sud).

Non confondere le linee di campo con le linee di magnetizzazione. Entrambe le linee ci dicono qualcosa a proposito di direzioni particolari. Mentre le linee di magnetizzazione danno informazioni sullo stato del ferro magnetizzato (visibile), le linee di campo descrivono lo stato del campo (invisibile).

18.6 Linee di magnetizzazione e linee di campo

Abbiamo visto come sia possibile rappresentare graficamente sia lo stato di magnetizzazione della materia che il campo magnetico. Ora vogliamo usare entrambe le rappresentazioni in un unico disegno. Per farlo ci ricordiamo della regola: le linee di magnetizzazione cominciano al polo sud e finiscono al polo nord, le linee di campo magnetico cominciano al polo nord e finiscono al polo sud. Possiamo riassumere questa regola:

Dove le linee di magnetizzazione finiscono, cominciano le linee di campo magnetico e viceversa.

Se rappresentiamo le linee di magnetizzazione e le linee di campo nello stesso disegno, sarebbe bene usare colori diversi.

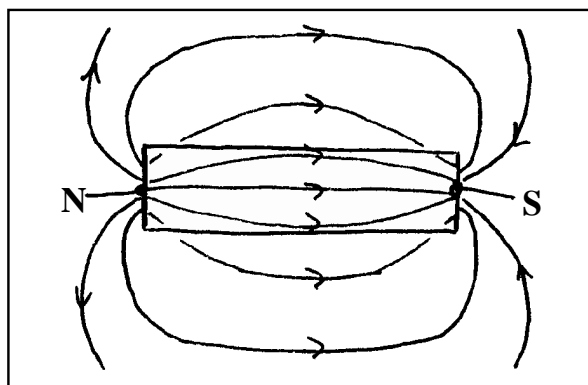


Fig. 18.21. Diagramma delle linee di campo. Il campo è più denso laddove le linee sono più vicine.

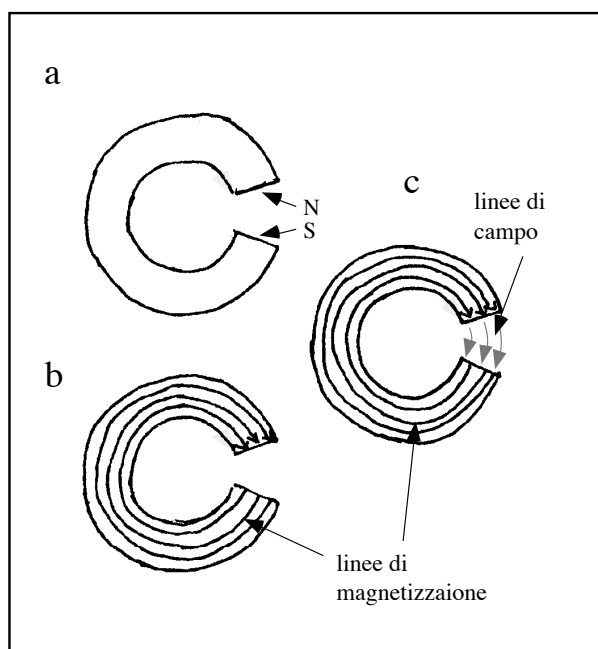


Fig. 18.22. (a) Magnete ad anello. (b) Magnete ad anello con linee di magnetizzazione. (c) Magnete ad anello con linee di magnetizzazione e linee di campo.

Consideriamo un magnete a forma di anello con un pezzo mancante. La fig. 18.22a mostra il magnete e i suoi poli. Come saranno le linee di magnetizzazione? La risposta più semplice è quella data in fig. 18.22b. Esaminando il campo con l'aiuto di un piccolo ago di bussola otterremo l'andamento delle linee di campo, fig. 18.22c.

Esercizio

La fig. 18.23 mostra un dispositivo composto da un magnete a ferro di cavallo e da un pezzo di ferro dolce. (a) In quali punti del ferro dolce si formano i poli? Di che tipo (positivo o negativo) di poli si tratta? Dove si trova il campo magnetico? Schizza le linee di campo. (c) Traccia le linee di magnetizzazione nel magnete e nel pezzo di ferro.

18.7 Campo magnetico e materia

Non abbiamo ancora parlato di una proprietà affascinante della materia. I magneti possono attirare o respingere anche attraverso altri corpi. Vogliamo esaminare più a fondo questi fenomeni.

Un chiodo viene appeso a un filo sottile e avvicinato a un magnete in modo che il magnete lo attiri ma senza toccarlo, fig. 18.24. Ora inseriamo delle lastre di vari materiali nello spazio tra il magnete e il chiodo.

Nella maggior parte dei casi il chiodo resta nella sua posizione originale, non si "accorge" nemmeno della presenza della lastra. È il caso per lastre di cartone, legno, vetro, diverse materie plastiche ma anche per la maggior parte dei metalli come allumi-

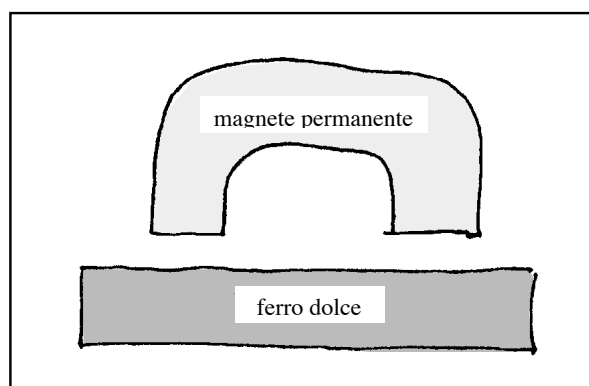


Fig. 18.23. Per l'esercizio

nio, rame e piombo. Sono esattamente quei materiali che non vengono attirati da un magnete, quindi che non si lasciano magnetizzare.

Queste sostanze vengono semplicemente attraversate dal campo magnetico. Le penetra come se non ci fossero nemmeno. Ti stupisce? È possibile che in uno stesso punto dello spazio ci siano due cose, cioè materia e campo? A dire il vero questa constatazione non è poi così sorprendente. Tutti noi conosciamo bene altri casi di due "sostanze" presenti nello stesso punto: quando la luce passa attraverso un vetro in alcuni punti ci sono luce e vetro. Allo stesso modo anche per esempio rame e campo magnetico possono essere nello stesso punto.

Il discorso cambia se nello spazio tra il magnete e il chiodo (vedi fig. 18.24) viene inserita una lastra di un materiale magnetico dolce, per esempio una lastra di ferro: il magnete lascia andare il chiodo, il chiodo ricade.

La lastra di ferro quindi non lascia passare il campo magnetico. Possiamo anche dare una formulazione più precisa. Ma prima, ancora un esperimento. Inseriamo tra magnete e chiodo una lastra di ferro molto sottile. Il chiodo ricade. Poi inseriamo due lastre sottili, poi tre, quattro, e così via. Ovviamente il chiodo ricade ogni volta. Ora consideriamo le due, tre, quattro lastre come una sola lastra spessa, fig. 18.25. E di questa lastra non possiamo dire solamente che il campo non esce dalla parte destra, ma

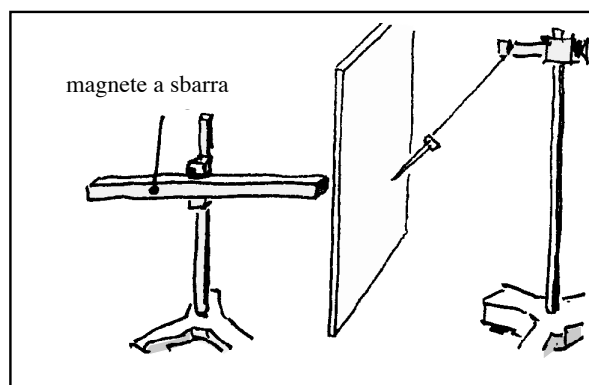


Fig. 18.24. Nello spazio tra polo magnetico e chiodo vengono inserite delle lastre di vari materiali.

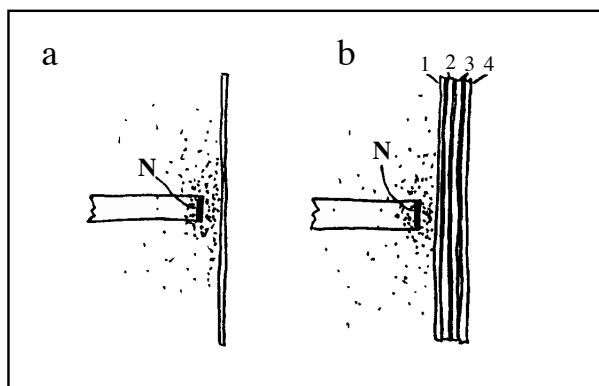


Fig. 18.25. Il campo non penetra nella piastra sottile, figura a. Di conseguenza non può penetrare nemmeno nelle lastre 2, 3 e 4, figura b.

anche che il campo nella lastra proprio non entra - perlomeno non più in profondità della prima lastra sottile. Con ciò abbiamo fatto un'altra importante scoperta:

Il campo magnetico non penetra in profondità nei materiali magnetici dolci.

Il fatto che i materiali magnetici dolci formino dei poli se avvicinati a un magnete, significa che reagiscono ai campi magnetici magnetizzandosi. Nel caso dell'esperimento in fig. 18.25 però, la magnetizzazione si limita a un sottile strato al di sotto della superficie.

Vogliamo scoprire in quali punti della nostra lastra si formano i poli. Per comodità usiamo un dispositivo "bidimensionale", fig. 18.26, in modo da poter evidenziare il campo con l'aiuto della limatura di ferro. Constatiamo: sulla sbarra di ferro dolce si forma un polo sud vicino al polo nord del magnete. A una certa distanza da questo polo sud si formano due poli nord, uno per parte. Qui la carica magnetica è però molto più diluita rispetto al polo sud posto al centro. Nella situazione originale non avevamo una sbarra ma una lastra. Dove sono i poli in questo caso? Il polo sud si trova esattamente di fronte al magnete. Il polo nord della lastra di ferro dolce ha la forma di un anello, fig. 18.27.

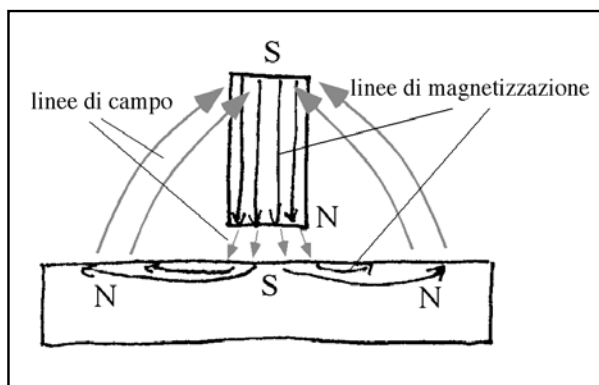


Fig. 18.26. Il polo nord del ferro dolce è suddiviso in due parti separate dal polo sud.

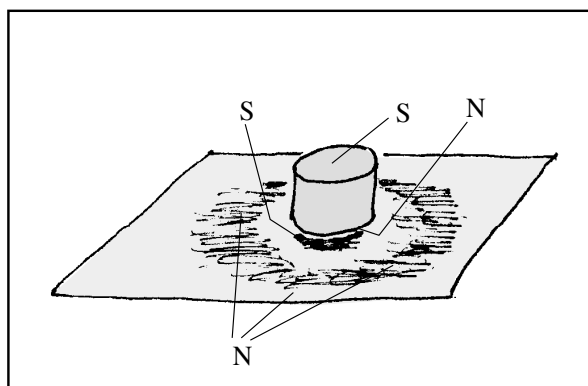


Fig. 18.27. Il polo nord della lastra di ferro dolce circonda il polo sud come un anello.

Esercizio

Traccia le linee di magnetizzazione e le linee di campo per il magnete in fig. 18.28a. Al centro del campo viene inserita una piccola lastra di ferro dolce, fig. 18.28b. Come sono ora le linee di magnetizzazione e le linee di campo?

18.8 L'energia del campo magnetico

Per separare due magneti attaccati fra loro si deve compiere uno sforzo, si deve usare energia. Dove va a finire questa energia?

A una piccola distanza da un forte magnete - il magnete è fissato al tavolo - c'è un altro magnete. Il primo magnete attira il secondo. Per un breve tempo il magnete in movimento potrebbe azionare qualcosa, per esempio una dinamo. Per farlo ci vuole energia. Da dove viene questa energia?

Confronta le due situazioni. Nel primo caso viene usata energia (dalla persona che separa i magneti) e si forma un campo magnetico. Nel secondo caso viene ceduta energia (alla dinamo) e il campo magnetico scompare. Concludiamo che il campo magnetico contiene energia.

Il campo magnetico contiene energia.

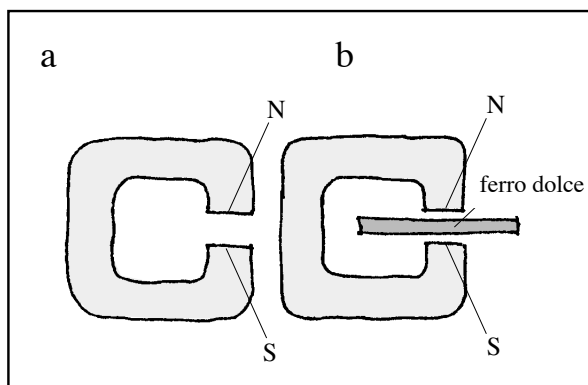


Fig. 18.28. Come sono le linee di magnetizzazione e le linee di campo prima e dopo aver inserito la lastra di ferro dolce?

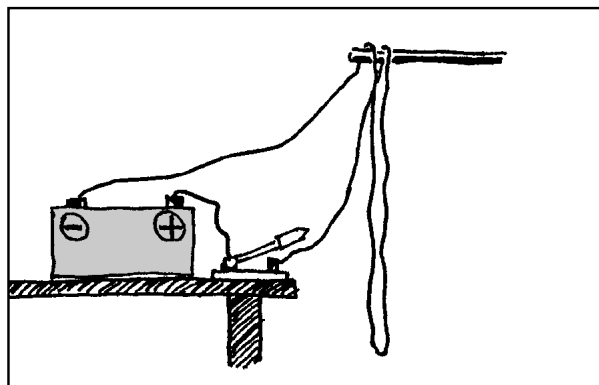


Fig. 18.29. Chiudendo il circuito i fili si respingono.

18.9 Corrente elettrica e campo magnetico

Un lungo filo viene appeso come mostrato in fig. 18.29. Il filo può essere collegato a una batteria d'automobile in modo che vi scorra una corrente elettrica: nella parte destra verso il basso e in quella sinistra verso l'alto. Possiamo chiudere il circuito solo per brevi momenti, in quanto la piccola resistenza del filo fa sì che la corrente superi i 50 A. Un'estremità del filo è collegata a un polo della batteria. Guardiamo i due tratti di filo appesi e tocchiamo brevemente l'altro polo della batteria con l'altra estremità del filo: i due tratti di filo si allontanano di colpo. Qualcosa li ha costretti a respingersi.

Ripetiamo l'esperimento ma facciamo in modo che nei due tratti di filo appesi la corrente scorra nella stessa direzione, fig. 18.30. Questa volta quando chiudiamo il circuito i due tratti di filo si avvicinano ancora di più.

Qual è il collegamento mediante il quale uno dei fili attira o respinge l'altro?

La risposta è facile da trovare. Avviciniamo un ago di bussola a un filo attraversato da una corrente elettrica intensa. Appena accendiamo la corrente l'ago si orienta in una direzione ben precisa, fig. 18.31. Se interrompiamo il circuito l'ago oscilla e torna nella sua posizione iniziale. Evidentemente quando è at-

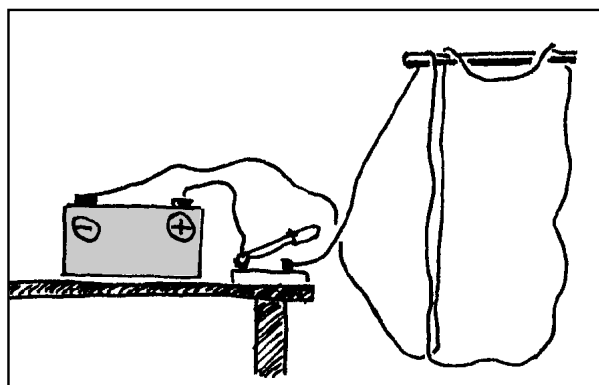


Fig. 18.30. Chiudendo il circuito i fili si attirano.

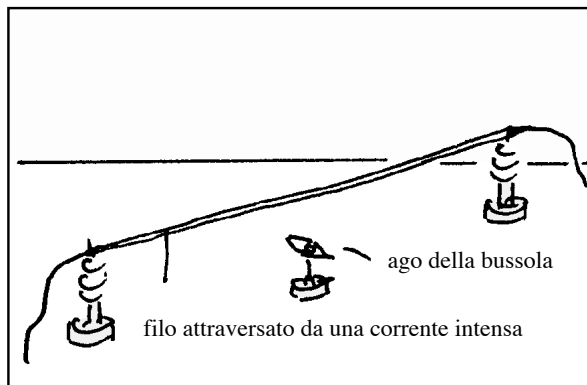


Fig. 18.31. Non appena si chiude il circuito, l'ago della bussola cambia direzione.

traversato da una corrente elettrica il filo è circondato da un campo magnetico.

Studiamo la direzione e la densità del campo con l'aiuto di un ago di bussola appeso a una cordicella. Si osserva che la direzione del campo è sempre perpendicolare alla direzione del filo dove scorre la corrente. Inoltre tutte le frecce del campo si trovano su dei cerchi il cui centro è sull'asse del filo.

La densità del campo diminuisce con la distanza, cioè se ci allontaniamo dal filo. La fig. 18.32a mostra il campo nella rappresentazione a punti, la fig. 18.23b con le frecce e la fig. 18.23c con le linee di campo. Possiamo notare come non siano né le punte né le code delle frecce a partire dal filo. Non dobbiamo cercare i poli magnetici - in questo caso non ce ne possono essere.

Sarebbe comunque stato strano se avessimo trovato dei poli sul filo: il filo è di rame, un materiale non magnetizzabile.

Una corrente elettrica è circondata da un campo magnetico. Se due fili paralleli sono percorsi da correnti nella stessa direzione il campo attira i fili l'uno verso l'altro. Se le correnti scorrono in direzioni diverse il campo allontana i fili l'uno dall'altro.

L'attrazione e repulsione tra correnti elettriche ha trovato delle applicazioni tecniche molto importan-



Fig. 18.32. Tre diverse rappresentazioni del campo magnetico nelle vicinanze di una corrente elettrica.

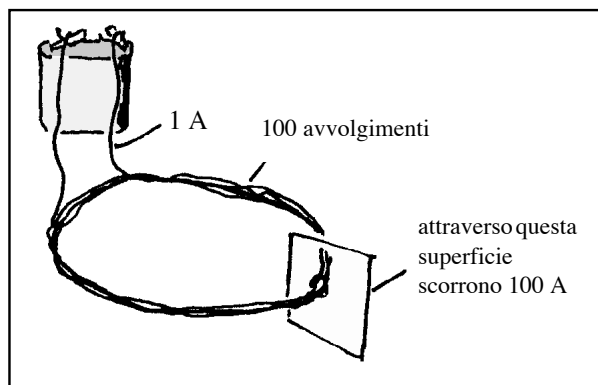


Fig. 18.33. Il campo del fascio di fili è denso come quello di un solo filo attraversato da una corrente di 100 A.

ti. Prima di essere possibili però si è dovuto amplificare questo effetto di attrazione o repulsione. Se con una corrente di 50 A riusciamo a malapena a smuovere due fili penzolanti, lo sforzo è esagerato in rapporto all'effetto ottenuto.

Con un trucco possiamo aumentare di molto la densità del campo magnetico causato da una corrente elettrica: facciamo passare lo stesso filo più di una volta dallo stesso punto o, meglio ancora, lo avvolgiamo in una *bobina*.

In fig. 18.33 il filo è stato arrotolato per 100 volte. Se nel filo passa una corrente di 1 A nella sezione evidenziata nel disegno ci sarà una corrente totale di 100 A. Quindi nei pressi del fascio di fili abbiamo un campo magnetico che ha la stessa intensità di quello attorno a un unico filo attraversato da una corrente di 100 A.

Un dispositivo molto comodo è la bobina cilindrica. Il filo viene arrotolato in forma cilindrica e in strati sovrapposti, fig. 18.34. (Naturalmente il filo deve essere isolato - altrimenti la corrente potrebbe prendere una via più breve.)

Esaminiamo la direzione e la densità del campo di una bobina, per esempio con l'aiuto di limatura di ferro. Il risultato è mostrato in fig. 18.35. Il campo ha la densità massima all'interno della bobina, dove in ogni punto ha la direzione dell'asse del cilindro.

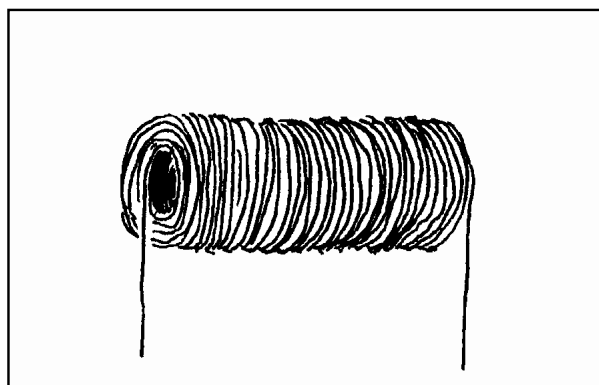


Fig. 18.34. Bobina cilindrica.

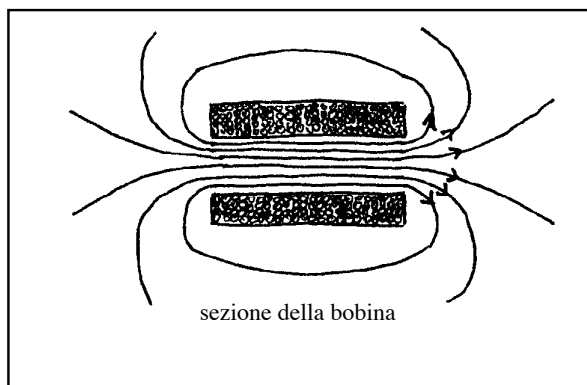


Fig. 18.35. Campo di una bobina cilindrica.

Esercizi

1. Come dobbiamo avvolgere una bobina per fare in modo che non sia circondata da un campo magnetico neanche quando è attraversata da una corrente elettrica?
2. In che direzione vengono spinti i fili di una bobina dal campo magnetico della bobina stessa? In che modo dipende dalla direzione della corrente elettrica che scorre nella bobina?

18.10 L'elettromagnete

Un magnete viene montato su un carrello. Il carrello viene posto davanti a una bobina come mostrato in fig. 18.36. Se chiudiamo il circuito della bobina il magnete con il carrello viene attirato o respinto dalla bobina - a seconda della direzione della corrente nella bobina.

Facciamo passare la corrente in modo che il carrello sia spinto via dalla bobina e poi posizioniamo il carrello alla distanza minima affinché non si muova, fig. 18.37. A questo punto inseriamo nella bobina da sinistra un pezzo di ferro dolce, un cosiddetto *nucleo di ferro*. Il carrello si rimette in moto, si allontana ulteriormente dalla bobina.

Come mai? Ricordiamoci cosa succede inserendo un pezzo di ferro dolce in un campo magnetico:

-il ferro dolce viene magnetizzato e si formano dei poli;

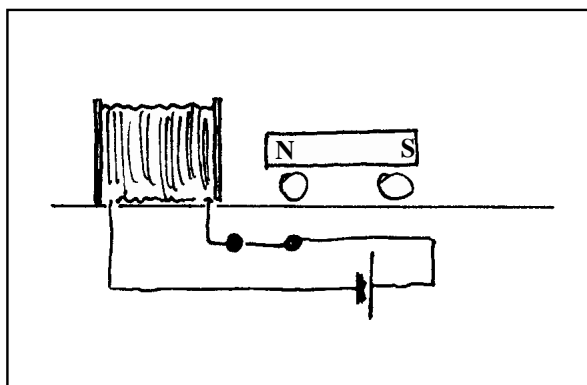


Fig. 18.36. Il campo spinge il magnete verso destra.

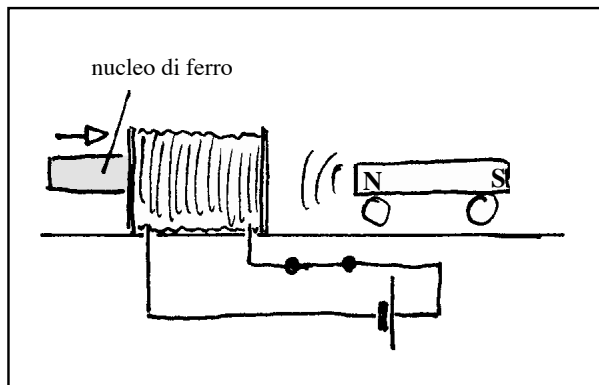


Fig. 18.37. Se inseriamo un nucleo di ferro nella bobina il magnete viene spinto ancora di più verso destra.

- il campo viene spostato.

Nel nostro caso il campo viene espulso dalla bobina, dopodiché ha la densità massima alle estremità del nucleo di ferro, fig. 18.38. I poli si formano sulle estremità del nucleo di ferro. La fig. 18.39 mostra la relazione tra la direzione della magnetizzazione e la direzione della corrente elettrica nella bobina.

Quindi abbiamo trasformato un pezzo di ferro dolce in un magnete. Ferro dolce e bobina formano un *elettromagnete*.

Il grosso vantaggio degli elettromagneti rispetto ai magneti permanenti sta nella possibilità di poterli accendere e spegnere. Si possono addirittura regolare in intensità e se ne può invertire la polarità.

Le figg. 18.40 - 18.42 mostrano con alcuni esempi come si può ottenere un'attrazione o una repulsione con l'aiuto degli elettromagneti.

Nella fig. 18.40a l'elettromagnete è ancora spento. In fig. 18.40b il polo nord dell'elettromagnete respinge il magnete permanente con l'aiuto del campo magnetico. In fig. 18.40c la corrente elettrica nella bobina scorre in direzione opposta. Dove prima c'era il polo nord dell'elettromagnete ora c'è il polo sud. Il polo sud dell'elettromagnete attira il polo nord del magnete permanente con l'aiuto del campo.

In fig. 18.41 il magnete permanente è stato sostituito con un pezzo di ferro dolce. Fintantoché l'elettro-

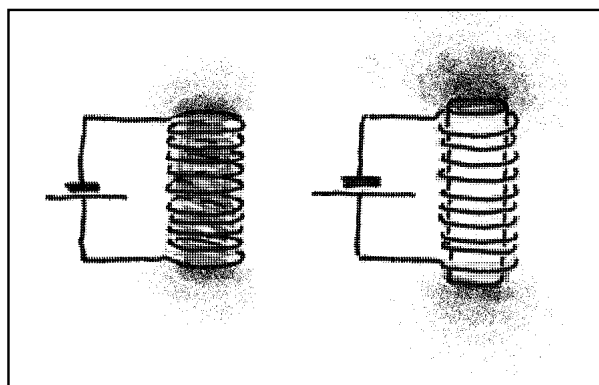


Fig. 18.38. Il nucleo di ferro espelle il campo dalla bobina.

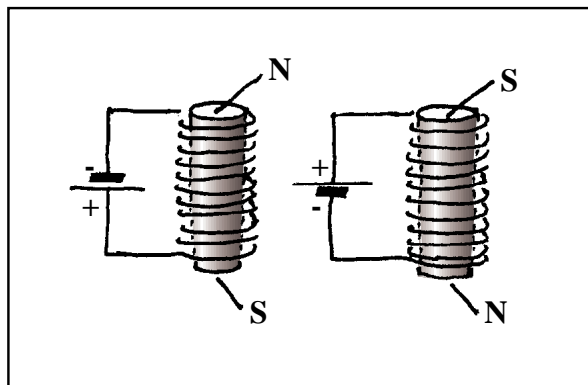


Fig. 18.39. Se invertiamo la direzione della corrente elettrica nella bobina, i poli del magnete si invertono.

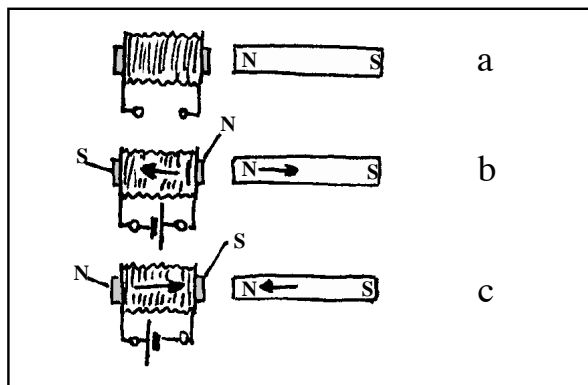


Fig. 18.40. Elettromagnete e magnete permanente.

magnete è spento, fig. 18.41a, non succede niente, non ci sono poli magnetici. L'elettromagnete viene acceso, fig. 18.41b. All'estremità destra dell'elettromagnete si forma un polo nord, all'estremità sinistra del pezzo di ferro un polo sud. I poli si attirano. Se invertiamo la direzione della corrente elettrica, fig. 18.41c, i poli dell'elettromagnete si scambiano la posizione, ma anche quelli del ferro dolce lo fanno. Di conseguenza abbiamo ancora attrazione.

Infine, la fig. 18.42 mostra due possibilità di combinare degli elettromagneti. Nel primo disegno c'è repulsione, nel secondo attrazione.

Gli elettromagneti hanno trovato numerose applicazioni. La più importante è il motore elettrico. Di esso ci occuperemo a fondo nel prossimo paragrafo.

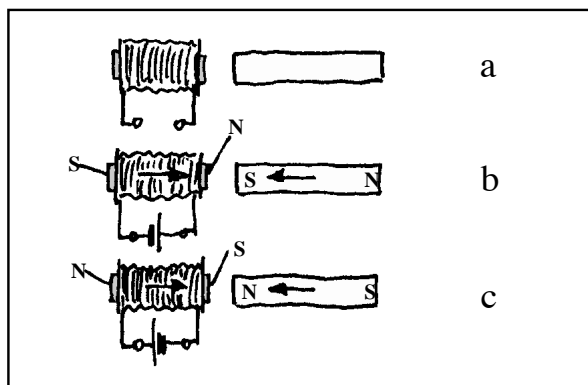


Fig. 18.41. Elettromagnete e ferro dolce.

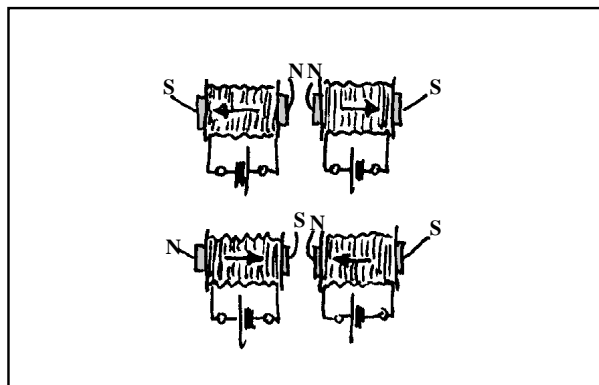


Fig. 18.42. Due elettromagneti.

Prima però, ecco qui di seguito alcuni apparecchi più semplici che funzionano grazie a un elettromagnete.

Il campanello elettrico

Quando premiamo il pulsante del campanello il circuito si chiude, fig. 18.43. L'elettromagnete attira il pezzo di ferro dolce, il batocchio colpisce la campana. A quel punto però, a causa dell'attrazione del ferro, il circuito si interrompe. L'elettromagnete rilascia il pezzo di ferro, il circuito si chiude e così via. Di conseguenza il batocchio colpisce la campana con colpi in rapida sequenza. Il clacson di un'automobile funziona in modo analogo.

L'apriporta elettrico

Nella scanalatura dove la serratura si incastra nel telaio della porta c'è un elettromagnete. Quando si chiude il circuito, il catenaccio (che dall'interno è mosso grazie alla maniglia) viene liberato e si può aprire la porta anche dall'esterno.

L'orologio elettrico

Negli orologi elettrici privi di display a cristalli liquidi c'è un elettromagnete attraversato a intervalli regolari, per esempio ogni secondo, da un impulso di corrente. Ad ognuno di questi impulsi l'elettromagnete sposta la lancetta un po' più avanti.

Amperometro

Un elettromagnete attira o respinge di più se la cor-

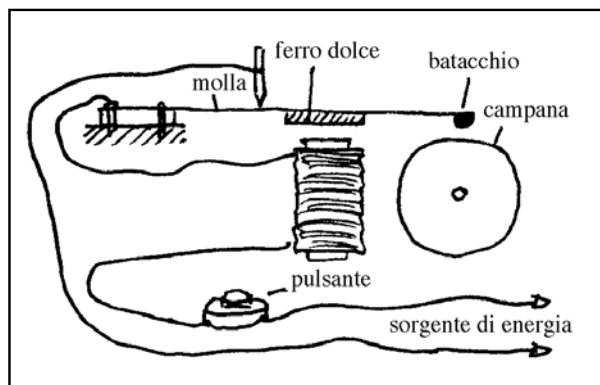


Fig. 18.43. Campanello elettrico.

rente che lo attraversa è più intensa. Questo fatto è sfruttato anche per misurare le correnti elettriche. La fig. 18.44 mostra come potrebbe funzionare un amperometro. Inizialmente la molla trattiene il magnete permanente contro il fermo. Se nei due elettromagneti c'è una corrente elettrica, alle loro estremità si formano dei poli. Il campo magnetico attira il polo nord del magnete permanente verso il polo sud dell'elettromagnete di destra e il polo sud del magnete permanente verso il polo nord dell'elettromagnete di sinistra. Più intensa è la corrente elettrica, maggiore sarà la carica magnetica sui poli, quindi sarà più intensa anche l'attrazione del campo sul magnete permanente e la lancetta.

La costruzione di un amperometro vero è un po' diversa ma il principio di funzionamento è lo stesso di quello del nostro apparecchio rudimentale di fig. 18.44.

Interruttori automatici

L'impianto elettrico di una casa ha un dispositivo di sicurezza che interrompe la corrente elettrica appena diventa troppo intensa. Un interruttore automatico funziona così: la corrente elettrica (nel circuito da rendere sicuro) viene condotta attraverso la bobina di un elettromagnete. Quando l'intensità della corrente elettrica raggiunge un determinato valore, la forza di trazione sarà sufficiente per azionare un interruttore che interrompe il circuito.

Il relais

Spesso si vuole usare una corrente debole per controllare una corrente forte. Il relais permette di farlo, fig. 18.45. Se chiudiamo l'interruttore I, l'elettromagnete è attraversato da una debole corrente elettrica. L'elettromagnete attira un pezzo di ferro dolce e chiude il circuito attraversato da una corrente molto forte.

Un'applicazione del relais che forse conosci: quando giriamo a fondo la chiave d'accensione nel cruscotto, si accende il motorino d'avviamento. (Il motorino di avviamento è un motore elettrico che "lancia" il motore a benzina. Riceve la sua energia dalla batteria dell'auto.) La corrente elettrica nel motorino d'avviamento è molto forte, circa 100 A. Per una

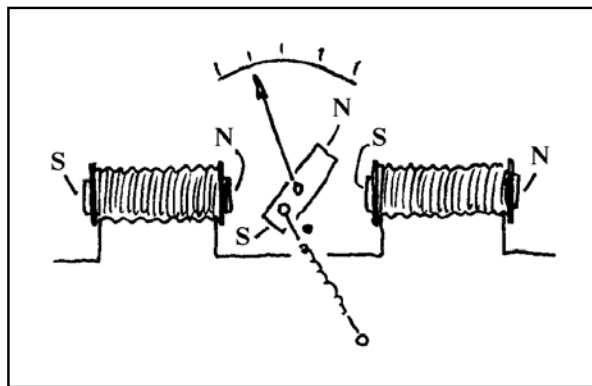


Fig. 18.44. Sul funzionamento dell'amperometro.

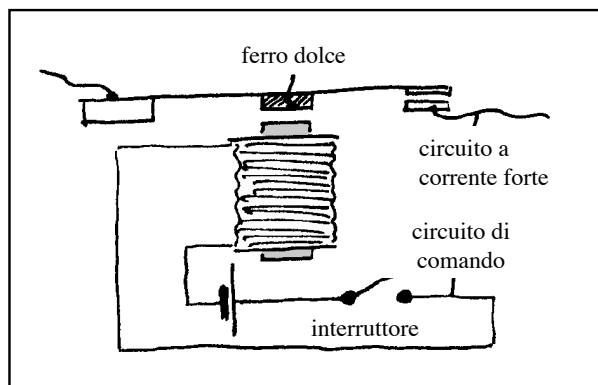


Fig. 18.45. Relais

corrente così forte ci vuole un interruttore grande e robusto. Un interruttore del genere è però troppo grande per trovare posto nel blocchetto dell'accensione. Quindi si accende il motorino d'avviamento grazie a un relais. La debole corrente del relais viene azionata da un piccolo interruttore inserito nel blocchetto dell'accensione.

Esercizi

1. In quali apparecchi si fa uso di elettromagneti? Elenca anche degli apparecchi non citati nel testo.
2. Inventa un campanello elettrico che funzioni solo con corrente alternata.
3. Come reagirebbe l'amperometro in fig. 18.44 a una corrente alternata? Invento un amperometro per corrente alternata.

18.11 Il motore elettrico

Vogliamo costruire un motore elettrico. Cominciamo da una versione molto rudimentale. Il nostro motore è simile all'apparecchio che serve a misurare l'intensità delle correnti elettriche in fig. 18.44.

Lo vediamo, dall'alto, in fig. 18.46. A destra e a sinistra ci sono due elettromagneti. In mezzo è montato un magnete permanente, libero di ruotare. Accendiamo la corrente elettrica. Alle estremità degli elettromagneti si formano dei poli. Il magnete a sbarra ruota in modo tale da avvicinare il più possibile i poli opposti, fig. 18.46a. Non appena il magnete permanente è parallelo agli elettromagneti, invertiamo la polarità della batteria. I poli degli elettromagneti si invertono a loro volta e ora i campi respingono i poli. Così la rotazione del magnete a sbarra continua, fig. 18.46b. Dopo un altro mezzo giro dobbiamo invertire di nuovo la polarità e così via. I campi mantengono in rotazione il magnete permanente.

Ti accorgerai che è molto difficile invertire la polarità degli elettromagneti al momento giusto. Si perde facilmente il ritmo. E con un motore azionato manualmente come questo non si possono certo fare grandi cose. Abbiamo bisogno di un motore che si manovri da solo, un motore che inverta automaticamente la direzione della corrente dopo ogni mezza rotazione.

Non è un problema costruire un dispositivo automatico del genere, basta montare un interruttore sul l'albero motore, un interruttore azionato dalla rotazione dell'albero.

L'inversione di polarità si realizza ancora più facilmente scambiando i ruoli di elettromagnete e magnete permanente: facciamo ruotare l'elettromagnete e fissiamo il magnete permanente, fig. 18.47. Il contatto elettrico è realizzato mediante due contatti striscianti e un anello collettore suddiviso in due metà isolate tra loro. L'elettromagnete è collegato a queste due metà.

Ogni mezzo giro del magnete permanente le metà dell'anello collettore passano da un contatto strisciante all'altro: il collegamento dell'elettromagnete che si trovava sul polo positivo ora passa sul polo negativo e quello che si trovava sul polo negativo passa su quello positivo. Quindi la corrente negli elettromagneti cambia sempre direzione nell'istante voluto.

Molti motori elettrici veri funzionano secondo questo principio. C'è però tutta una serie di trucchi usati nella costruzione dei motori elettrici. Ma una cosa l'hanno tutti in comune: è sempre il campo magnetico a tirare e spingere il magnete permanente.

Esercizi

1. Possiamo usare il motore in fig. 18.46 come motore a corrente alternata. Non c'è più bisogno di manovrarlo manualmente. Un motore del genere viene detto motore sincrono. Che problemi sorgono?
2. Disegna un motore che abbia un elettromagnete sia come magnete fisso che come magnete ruotante.

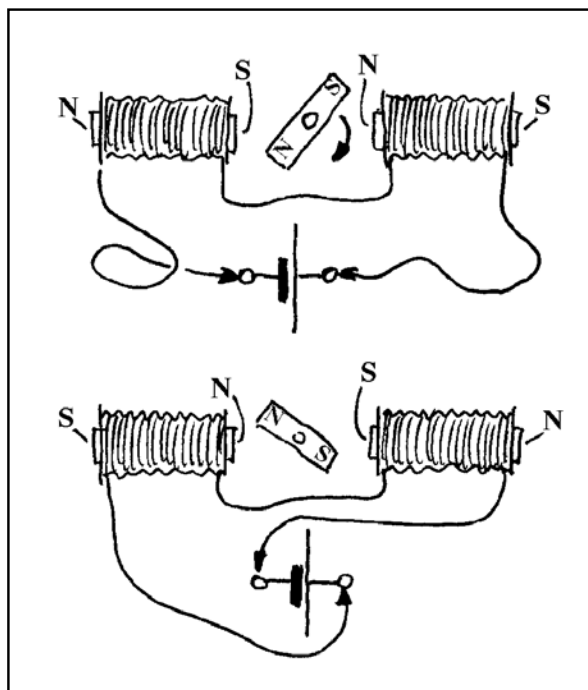


Fig. 18.46. Sul funzionamento del motore elettrico.

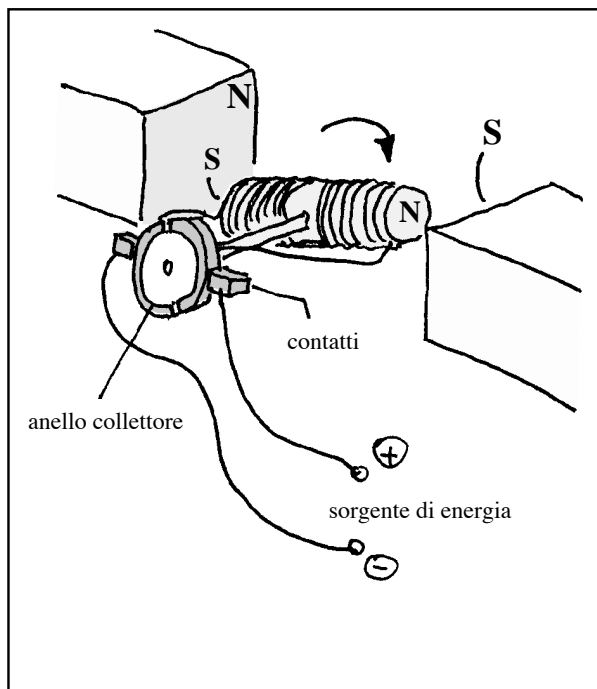


Fig. 18.47. Motore elettrico.

18.12 Il campo magnetico terrestre

Come abbiamo già visto, un magnete a sbarra libero di ruotare attorno a un asse verticale si posizionerà grossomodo in direzione nord-sud. Uno dei suoi poli punta verso nord, l'altro verso sud, fig. 18.48. L'estremità del magnete che punta verso nord è stata chiamata polo nord, l'altra polo sud.

Ogni bussola si basa su questo effetto. L'ago della bussola è semplicemente un magnete permanente molto leggero e montato in modo da ruotare liberamente.

In verità l'ago della bussola non indica esattamente la direzione nord-sud. Per di più lo sfasamento rispetto a questa direzione è diverso nei vari punti della Terra. E cambia persino nel tempo, seppur lentamente.

In ogni caso possiamo concludere che la Terra è circondata da un campo magnetico. E si è constatato che questo campo magnetico è presente anche all'interno del pianeta.

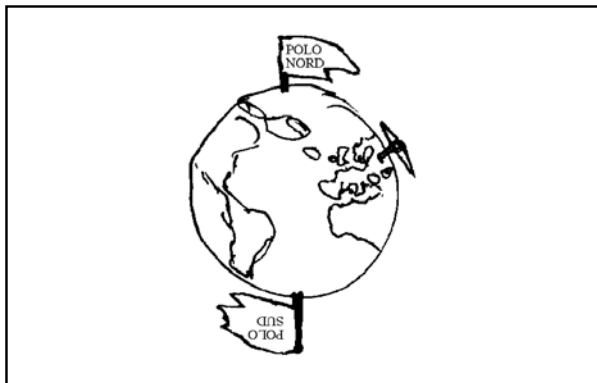


Fig. 18.48. Un magnete libero di ruotare si orienta in direzione nord-sud.

Da dove viene questo campo? Le cause possono essere due. O la Terra è un enorme magnete permanente, oppure nella Terra scorrono delle correnti elettriche. Una volta si propendeva per la prima ipotesi, si pensava che la Terra fosse un grande magnete permanente. In quel caso la carica del polo nord dovrebbe trovarsi nei pressi del Polo Sud (geografico) e la carica del polo sud vicino al Polo Nord (geografico), visto che il polo nord del magnete viene attratto verso nord.

Ma già nell'800 ci si è resi conto che l'ipotesi doveva essere sbagliata. Al centro della Terra è così caldo che ogni sostanza perderebbe il suo magnetismo. Di conseguenza solo le correnti elettriche possono essere la causa del campo magnetico terrestre. Ci sono diverse teorie sulla nascita di queste correnti. Quale sia quella giusta non è ancora sicuro.

Esercizi

1. Perché una bussola indica la direzione sbagliata se nelle vicinanze ci sono dei pezzi di ferro?
2. Due aghi di bussola vengono posti molto vicini l'uno all'altro. In che direzione puntano?

18.13 L'induzione

Un voltmetro è collegato a una bobina. Se inseriamo il magnete permanente nella bobina, fig. 18.49, l'ago del voltmetro devia da una parte - però solo fintanto che il magnete si muove. Se togliamo il magnete dalla bobina, l'ago del voltmetro devia di nuovo, ma dalla parte opposta.

La direzione della deviazione dell'ago dipende da quale polo inseriamo nella bobina, il polo nord o il polo sud.

Con il movimento del magnete modifichiamo il campo all'interno della bobina. Questa variazione del campo magnetico è la causa della tensione tra le estremità della bobina.

Ci chiediamo anche cosa succede se durante l'esperimento cortocircuitiamo la bobina. Quindi la cortocircuitiamo, ma inseriamo un amperometro nel cir-

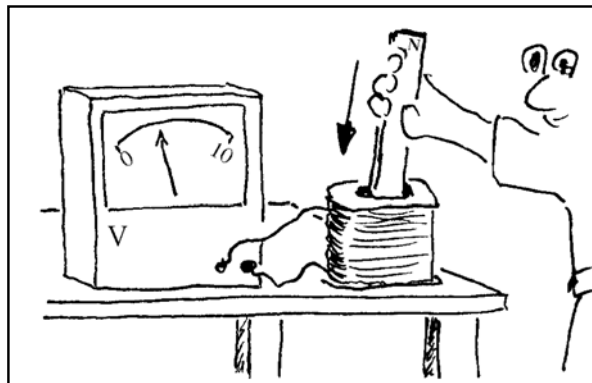


Fig. 18.49. Il voltmetro devia fintanto che il magnete si muove.

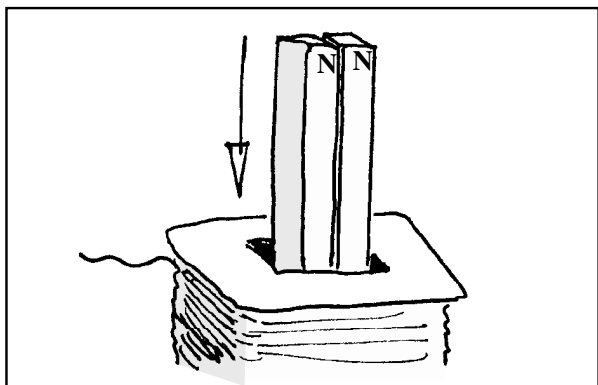


Fig. 18.50. Se il campo magnetico è più denso viene indotta una tensione maggiore.

cuito, in parallelo alla bobina. Risultato: quando inseriamo il magnete l'ago dell'amperometro devia e quando lo estraiamo pure (come probabilmente ti aspettavi).

Questo processo viene chiamato *induzione*. Si dice che muovendo il magnete viene *indotta* una tensione o una corrente elettrica.

Maggiore è la variazione del campo della bobina, più grande sarà la tensione indotta. Proviamo ora a produrre la tensione indotta più grande possibile. Dobbiamo fare in modo che il campo nella bobina cambi il più possibile e il più in fretta possibile.

Dapprima constatiamo che la tensione aumenta se muoviamo più in fretta il magnete permanente. A un certo punto però, un movimento più rapido non cambia la risposta dell'apparecchio di misurazione. Ma questo dipende solo dal fatto che l'apparecchio "non segue più", è troppo inerte. Se usiamo un oscilloscopio ci accorgiamo che un movimento molto rapido effettivamente genera delle tensioni più elevate.

Il prossimo passo consiste nell'aumentare la variazione del campo inserendo non uno ma due magneti nella bobina, con i poli affiancati, fig. 18.50.

Un terzo metodo per rafforzare l'effetto di induzione consiste nell'utilizzare una bobina con più avvolgimenti.

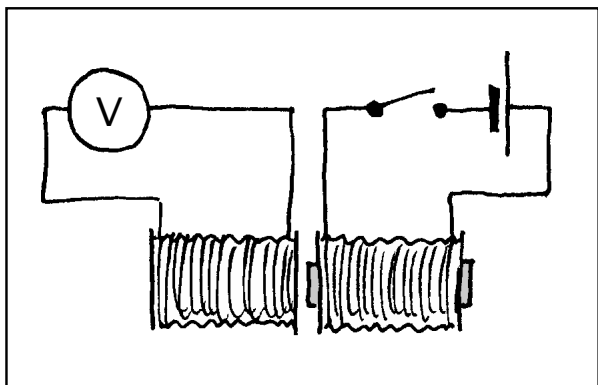


Fig. 18.51. Accendendo e spegnendo l'elettromagnete viene modificata la densità del campo magnetico nella bobina e viene indotta una tensione.

Possiamo causare una variazione del campo anche in maniera completamente diversa - cioè senza che niente si muova: accanto alla bobina mettiamo un elettromagnete il cui campo penetri nella bobina stessa, fig. 18.51. Accendendo o spegnendo l'elettromagnete il campo all'interno della bobina varia e viene generata una tensione indotta.

Se il campo magnetico in una bobina varia, tra le estremità della bobina c'è una tensione elettrica. Se il circuito è chiuso scorre una corrente elettrica. Questo processo è detto induzione.

Diamo ancora una variante dell'esperimento sull'induzione. Inseriamo nella bobina un nucleo di ferro dolce e prolunghiamo le estremità del nucleo in modo che formi una "U". Ora nessun campo magnetico può penetrare nella bobina. C'è ancora induzione? Avviciniamo le estremità del nucleo di ferro a un magnete permanente, fig. 18.52, fino a che i poli del magnete le toccano. Osservazione: l'ago del voltmetro devia. Come è possibile? Nella bobina non è successo niente. E invece sì, qualcosa è successo! Il ferro nella bobina è stato magnetizzato, la sua magnetizzazione è cambiata.

Ora giriamo il magnete permanente in modo che il polo nord sia dove prima c'era il polo sud e il polo sud dove prima c'era il polo nord. Nella bobina viene indotta una tensione anche durante questo processo. Quindi il risultato di questo esperimento è

anche quando cambia la magnetizzazione del materiale presente nella bobina viene indotta una tensione (una corrente).

Il funzionamento di alcuni apparecchi molto importanti si basa sull'induzione. Alcuni li conosceremo ora.

Esercizi

1. Con l'aiuto di un magnete permanente si vuole indurre una tensione in una bobina. Cosa dobbiamo fare per ottenere la tensione massima? Cita almeno tre misure da prendere.
2. Una bobina è tenuta in modo che il suo asse sia verticale, così che vi si possano far cadere degli oggetti. La bobina viene collegata a un oscilloscopio. Lasciamo cadere un magnete a sbarra attraverso la bobina. Cosa indica l'oscilloscopio?

18.14 Il generatore

Un generatore fa esattamente il contrario di un motore elettrico. Mentre un motore elettrico riceve energia con il portatore elettricità e la cede con il portatore quantità di moto angolare, fig. 18.53a, il generatore riceve energia con il portatore quantità di moto angolare e la cede con l'elettricità, fig. 18.53b.

Di conseguenza un generatore è fatto grossomodo come un motore elettrico. Potremmo usare come generatore il motore schizzato in fig. 18.47. Dob-

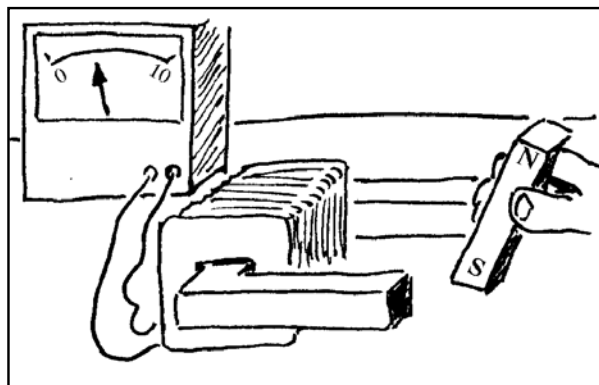


Fig. 18.52. Anche la variazione della magnetizzazione all'interno della bobina induce una tensione.

biamo solo sostituire la sorgente elettrica di energia con un ricevitore elettrico di energia, per esempio una lampadina. Se ruotiamo l'albero abbastanza in fretta la lampadina si accende. Non è difficile spiegare il funzionamento del generatore: il nucleo di ferro della bobina rotante viene magnetizzato due volte al giro dai magneti permanenti. Ogni volta viene indotta una tensione tra i capi della bobina. Il segno della tensione indotta cambia due volte al giro. I contatti striscianti e l'anello collettore diviso in due, fanno in modo che la tensione nei collegamenti del generatore abbia sempre lo stesso segno. (Il valore di questa tensione non è costante nel tempo: non si può parlare di una vera e propria tensione continua.)

Costruire un generatore a corrente alternata è ancora più facile. Sapresti come fare?

Il generatore è una delle macchine più importanti di ogni centrale elettrica.

I generatori sono spesso chiamati in altro modo: in una bicicletta si chiama dinamo, in un'auto alternatore.

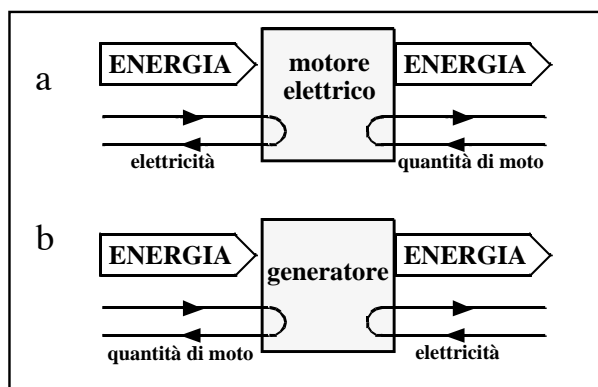


Fig. 18.53. Diagrammi di flusso del motore elettrico e del generatore.

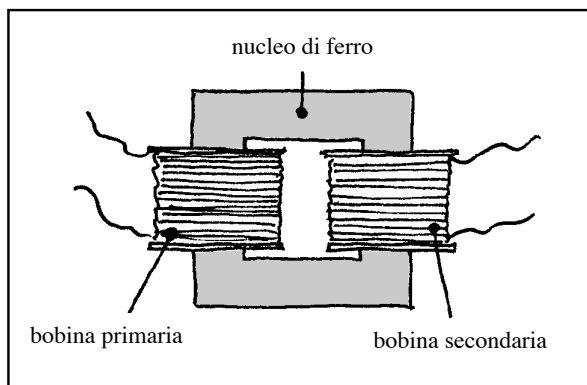


Fig. 18.54. Costruzione di un trasformatore.

18.15 Il trasformatore

Molti apparecchi elettrici, la radio a transistor, il walkman e i motori dei giocattoli, necessitano di una tensione molto più bassa dei 220 V della presa. Se vogliamo allacciare questi apparecchi alla rete dobbiamo ridurre la tensione di 220 volt a un valore inferiore, dobbiamo "trasformarla". A questo scopo tra la presa e l'apparecchio si inserisce un *trasformatore*.

Un trasformatore consiste in un nucleo di ferro e due bobine, fig. 18.54. Una delle bobine, la cosiddetta bobina primaria, viene collegata alla presa; all'altra, la bobina secondaria, colleghiamo il ricevitore di energia, cioè l'apparecchio che vogliamo utilizzare.

Cerchiamo di capire meglio il funzionamento di un trasformatore. Colleghiamo una bobina del trasformatore a una lampadina e l'altra, con un interruttore, a una batteria, fig. 18.55. Se chiudiamo l'interruttore la lampadina si accende brevemente. Se riapriamo l'interruttore la lampadina si accende di nuovo brevemente. La spiegazione è facile: sia aprendo che chiudendo l'interruttore la magnetizzazione del nucleo di ferro cambia ovunque. In particolare cambia anche all'interno della bobina secondaria, dove viene indotta una tensione.

Affinché la lampadina resti accesa, la corrente elettrica nella bobina primaria dovrebbe essere accesa e spenta in rapida successione e in continuazione. Oppure possiamo collegare la bobina primaria con una

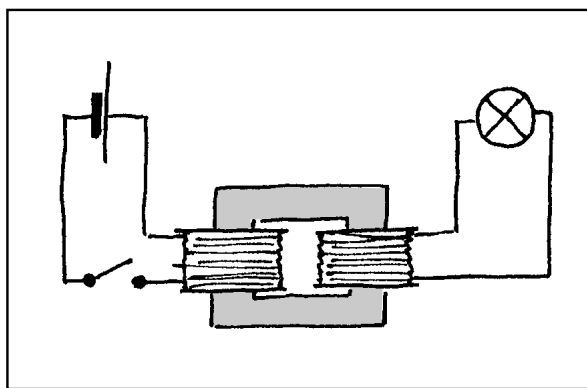


Fig. 18.55. Aprendo e chiudendo l'interruttore la lampadina si accende brevemente.

sorgente di tensione alternata. Quindi vediamo che un trasformatore funziona solo con tensione alternata.

Come facciamo ad aumentare o diminuire la tensione grazie a un trasformatore? Il valore della tensione indotta dipende dal numero di avvolgimenti delle due bobine. Vogliamo scoprire in che modo.

A questo scopo costruiamo dei trasformatori con bobine che abbiano un numero diverso di avvolgimenti. Dapprima constatiamo che se le bobine primaria e secondaria hanno lo stesso numero di avvolgimenti anche le tensioni primaria e secondaria sono uguali. Se la bobina secondaria ha il doppio di avvolgimenti della bobina primaria, anche la tensione secondaria è doppia della tensione primaria. In generale vale:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

dove U_1 e U_2 sono le tensioni sulla bobina primaria e secondaria e n_1 e n_2 i rispettivi numeri di avvolgimenti.

Mentre la corrente elettrica in un trasformatore scorre in due circuiti separati, fig. 18.56a, l'energia passa dalla parte primaria alla parte secondaria, fig. 18.56b.

L'intensità P_1 della corrente di energia che affluisce al trasformatore è, tralasciando piccole perdite, uguale all'intensità P_2 che defluisce dal trasformatore. Quindi

$$P_1 = P_2$$

E, visto che $P = U \cdot I$, deve valere

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2$$

U_1 , U_2 , I_1 e I_2 sono le tensioni e le intensità di corrente nel circuito primario e in quello secondario.

Dall'ultima equazione segue che a una diminuzione della tensione di un certo fattore corrisponde un au-

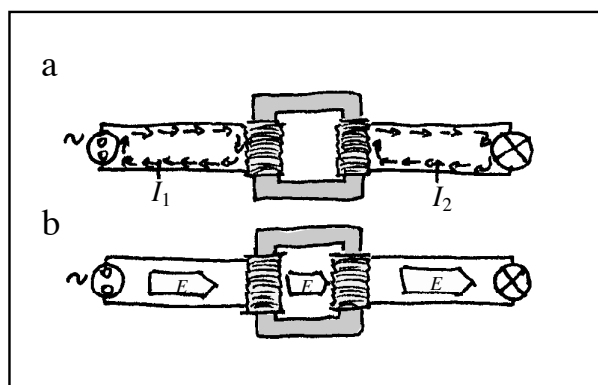


Fig. 18.56. Percorso della corrente elettrica (a) e della corrente di energia (b) in un trasformatore.

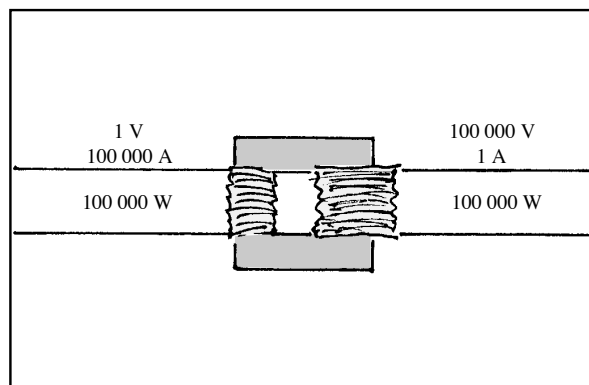


Fig. 18.57. Per l'esercizio 4

mento dello stesso fattore dell'intensità della corrente elettrica. Allo stesso modo a un aumento della tensione corrisponde una diminuzione dello stesso fattore della corrente elettrica.

Esercizi

1. Le bobine di un trasformatore hanno 1000 rispettivamente 5000 avvolgimenti. Abbiamo a disposizione una tensione alternata di 220 V. Quali tensioni possiamo generare con questo trasformatore?
2. La bobina primaria di un trasformatore è collegata alla presa di corrente. Sulla bobina secondaria viene misurata una tensione di 11 V. Cosa possiamo dire del numero di avvolgimenti delle bobine del trasformatore? Nel circuito secondario scorre una corrente elettrica di 2 A. Qual è l'intensità della corrente nel circuito primario?
3. Un trasformatore ha una bobina primaria con 1000 avvolgimenti e una bobina secondaria con 10 000 avvolgimenti. La bobina primaria è collegata alla presa. La corrente primaria è di 100 mA. Quanto valgono la tensione secondaria e la corrente secondaria?
4. Attraverso il trasformatore in fig. 18.57 scorre una corrente di energia di 100 kW. Che caratteristiche devono avere i conduttori? Perché l'energia portata dall'elettricità viene trasportata preferibilmente con l'alta tensione?

18.16 Le correnti indotte dal campo magnetico

Torna per un attimo al paragrafo 18.10. Avevamo constatato che un elettromagnete

- può attrarre o respingere un magnete permanente, fig. 18.44;
- può attrarre o respingere un altro elettromagnete, fig. 16.46;
- attira sempre un pezzo di ferro dolce, fig. 18.45.

Facciamo ora degli esperimenti molto simili a quelli descritti nel paragrafo 18.10, fig. 18.58. Accanto a un elettromagnete mettiamo una bobina mobile - in modo da rendere osservabile un'eventuale attrazione o repulsione. Accendiamo l'elettromagnete e

non succede niente - come ti saresti aspettato. Dopo tutto una bobina non percorsa da una corrente non è né un magnete né un pezzo di ferro dolce.

Modifichiamo leggermente l'esperimento: colleghiamo tra loro gli allacciamenti della bobina. Risultato: la bobina si allontana. Com'è possibile?

Si può spiegare solo ammettendo che nella bobina scorra una corrente. Ma come si forma questa corrente nella bobina? Naturalmente a causa dell'induzione. Accendendo l'elettromagnete si modifica il campo magnetico nella bobina e di conseguenza nella bobina viene indotta una corrente. A sua volta questa corrente causa un campo magnetico. I due campi magnetici - quello dell'elettromagnete e quello della bobina - si respingono. Ma la repulsione smette subito, visto che il campo magnetico indotto esiste solo per un tempo brevissimo: solo durante l'accensione dell'elettromagnete.

Ripetiamo l'esperimento invertendo la polarità dell'elettromagnete. La corrente scorre in direzione opposta. Osservazione: la bobina viene nuovamente respinta. Sorpresa! Oppure no? In effetti ci si

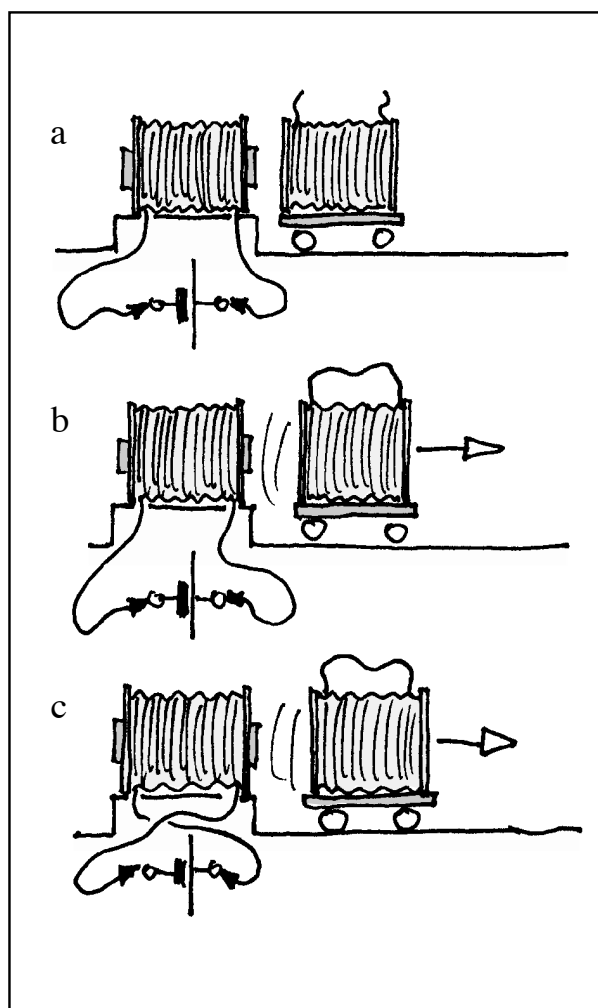


Fig. 18.58. (a) Una bobina non collegata non viene né respinta né attratta. (b) e (c) Accendendo l'elettromagnete una bobina cortocircuitata viene sempre respinta, indipendentemente dalla direzione della corrente.

doveva attendere questo risultato: abbiamo sì invertito la polarità dell'elettromagnete, ma anche la corrente indotta scorre in direzione opposta. Quindi abbiamo invertito entrambi i "magneti" (elettromagnete e bobina) e questo non trasforma un'attrazione in una repulsione.

Possiamo formulare una regola:

La direzione della corrente indotta in una bobina è tale da causare repulsione tra la bobina stessa e il magnete che causa l'induzione.

18.17 Superconduttori

C'è tutta una serie di sostanze che, se raffreddate al di sotto di una certa temperatura, perdono la loro resistenza elettrica. Si chiamano *superconduttori*. Per alcune di queste sostanze la temperatura di transizione tra lo stato normale e quello di superconduttore è relativamente alta: a circa $-180\text{ }^{\circ}\text{C}$. È abbastanza facile renderle superconduttrici, basta raffreddarle con azoto liquido.

I superconduttori non sono interessanti solo per il fatto di non avere resistenza elettrica. Hanno anche delle proprietà magnetiche sorprendenti.

Con dei magneti permanenti costruiamo un dispositivo che abbia il campo rivolto verso l'alto e con un "avvallamento" al centro, fig. 18.59. Ora avviciniamo dall'alto un pezzetto di superconduttore e lo lasciamo andare. Il superconduttore non cade ma galleggia al di sopra del magnete, fig. 18.60. Possiamo ruotarlo e anche spingerlo leggermente sui lati: continua a galleggiare (ovviamente solo fino a quando si riscalda abbastanza per tornare allo stato normale).

Evidentemente il superconduttore viene respinto dal magnete. Quindi si comporta esattamente all'opposto del ferro dolce che, come visto, viene sempre attratto. Come si può spiegare? Ricordiamoci del risultato del paragrafo precedente: una bobina è sempre respinta da un elettromagnete.

La spiegazione per la repulsione del superconduttore è la stessa: non appena il superconduttore è nei

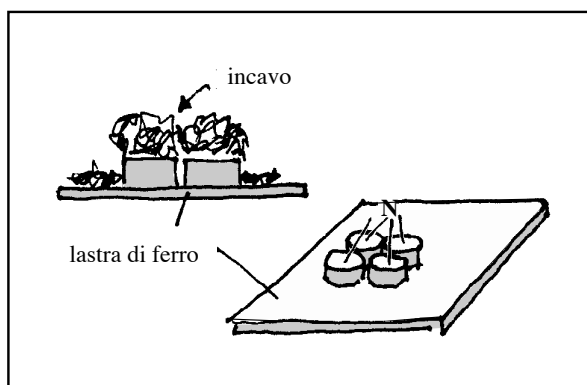


Fig. 18.59. Il campo dei magneti forma un incavo.

pressi di un magnete, comincia a essere percorso da correnti elettriche orientate in modo da generare repulsione. Nella bobina queste correnti si interrompevano subito, frenate dalla resistenza della bobina. In un superconduttore queste correnti continuano a scorrere, a condizione di lasciarlo sopra il magnete. Infatti non c'è resistenza che possa frenarle.

Un esame più accurato, che non possiamo fare qui, mostrerebbe inoltre che:

- le correnti scorrono solo in un sottile strato appena al di sotto della superficie del superconduttore;

- il campo magnetico non penetra all'interno del superconduttore.

Quindi i superconduttori hanno delle caratteristiche simili a quelle dei materiali magnetici dolci. Nemmeno loro lasciano penetrare il campo magnetico. Il risultato è lo stesso ma il "trucco" usato no: invece di formare dei poli magnetici, lanciano delle correnti elettriche.

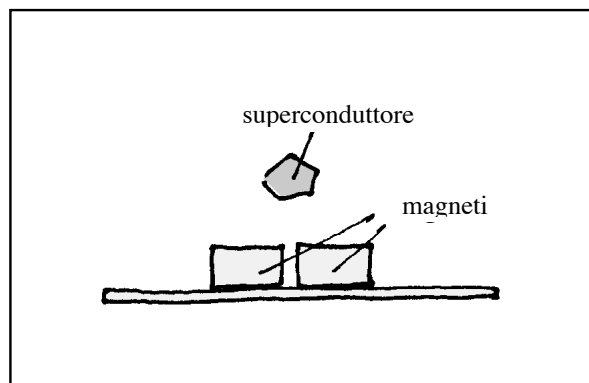


Fig. 18.60. Il superconduttore galleggia sostenuto dal campo magnetico dei magneti.

19. Elettrostatica

19.1 Carica e portatore di carica

Quando in un filo l'elettricità si sposta da un punto a un altro parliamo di corrente elettrica. Finora ci siamo occupati degli effetti delle correnti elettriche e delle relazioni tra l'intensità della corrente elettrica e altre grandezze. Ma non ci siamo chiesti niente riguardo agli effetti e alle proprietà dell'elettricità stessa. Si dovrebbero poter esaminare quando l'elettricità non si muove, cioè in assenza di correnti elettriche.

Dobbiamo ammettere che l'elettricità di un filo di rame non inserito in un circuito non si nota. Come mai? Una possibile risposta è: l'elettricità a riposo non ha proprietà tali da renderla percepibile. Ma non è una risposta esatta. L'elettricità si fa notare eccome, già quando è presente in piccolissime quantità. La sua descrizione è affidata all'*elettrostatica*. Il fatto di non percepirla in un filo di rame dipende da una proprietà dell'elettricità che la distingue da molte altre grandezze: può assumere valori positivi e negativi.

Tutte le sostanze materiali contengono elettricità, ma solitamente ne contengono uguali quantità di positiva e di negativa, cosicché la quantità totale è nulla. Per esempio 1 g di rame contiene 44 032 C di carica positiva. Ma contiene la stessa quantità di carica negativa; la quantità totale risulta quindi 0 C.

(Per confronto: la massa, cioè la grandezza misurata in kg, assume solo valori positivi.)

L'elettricità può assumere valori positivi e negativi.

Ma che senso ha dire di un corpo la cui elettricità totale sia 0 C, che in effetti contiene una stessa quantità di elettricità positiva e negativa? Dopotutto 0 C significa che il corpo *non ha* elettricità. Se consideriamo la struttura microscopica della materia, capiamo perché ha senso dire che il rame (o qualsiasi altra sostanza) contiene sia elettricità positiva che negativa.

Tutte le sostanze sono composte da atomi e gruppi di atomi, le molecole, e ogni atomo è composto da un nucleo di protoni e neutroni e da un guscio elettronico. Due di queste componenti degli atomi portano elettricità. Il protone porta elettricità positiva

$$Q_{\text{protone}} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

L'elettrone porta elettricità negativa

$$Q_{\text{elettrone}} = - 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

I neutroni non portano elettricità

$$Q_{\text{neutrone}} = 0 \text{ C.}$$

Visto che un atomo ha lo stesso numero di protoni e di elettroni, l'elettricità totale portata da un atomo è 0 C.

Può succedere che un atomo abbia uno o più elettroni di troppo o che gli manchino. In questo caso si chiama *ione*. La quantità di elettricità di uno ione non è nulla.

Abbiamo appena imparato un'altra proprietà importante dell'elettricità: l'elettricità si trova sempre su qualche particella. Accanto a protoni e elettroni c'è tutta una serie di altre particelle elettricamente cariche: positroni, muoni, antiprotoni e altre ancora. In condizioni normali non ne vediamo, ma si possono creare artificialmente. Hanno però una vita media estremamente breve.

Delle particelle sulle quali si trova l'elettricità diciamo che sono *elettricamente cariche*. Per questo motivo l'elettricità viene detta *carica elettrica*. Le particelle cariche, cioè elettroni, protoni, ioni, ecc., sono detti *portatori di carica*.

La carica elettrica (elettricità) si trova sempre su particelle (i portatori di carica).

19.2 Corrente di carica e corrente del portatore di carica.

Ora possiamo capire cosa distingue un materiale conduttore da uno non conduttore: i conduttori sono sostanze che contengono portatori di carica *mobili*; negli isolanti tutti i portatori di carica sono *immobili*. Di volta in volta il portatore di carica in un conduttore può essere diverso. In alcuni si muovono solo i portatori positivi, in altri solo quelli negativi e in altri ancora sia quelli positivi che negativi.

Nei metalli i portatori di carica mobili sono gli elettroni. Ma non tutti gli elettroni del metallo si possono muovere, solo uno per atomo. Negli acidi, nelle basi e nelle soluzioni saline non ci sono elettroni mobili. La conducibilità elettrica è causata dalla mobilità degli ioni. Visto che ci sono ioni positivi e ioni negativi, anche in questo caso abbiamo dei portatori di carica di entrambi i segni.

Quando in un circuito scorre una corrente elettrica, i portatori di carica mobili si spostano rispetto al resto delle cariche di segno opposto, cosicché il circuito resta neutro ovunque: nessun conduttore, sorgente di energia o ricevitore di energia si carica elettricamente.

Ci rendiamo conto che si può ottenere una corrente elettrica in vari modi. In tutti e tre gli esempi in fig. 19.1 abbiamo una corrente elettrica di 2 A che scorre da sinistra verso destra. Nella parte (a) come risultato dello spostamento di portatori di carica positiva da sinistra verso destra. Nel caso (b) perché portatori di carica negativa scorrono da destra verso sinistra. Nella parte (c) sia i portatori di carica positiva sia quelli di carica negativa si muovono; entrambi contribuiscono alla corrente totale.

Ti sorprenderà sapere con che lentezza si muovono i portatori di carica in un conduttore: se in un filo di rame di 1 mm^2 di sezione scorre una corrente elettrica di 1 A, la velocità dei portatori di carica mobili (gli elettroni mobili) è $0,07 \text{ mm/s}$.

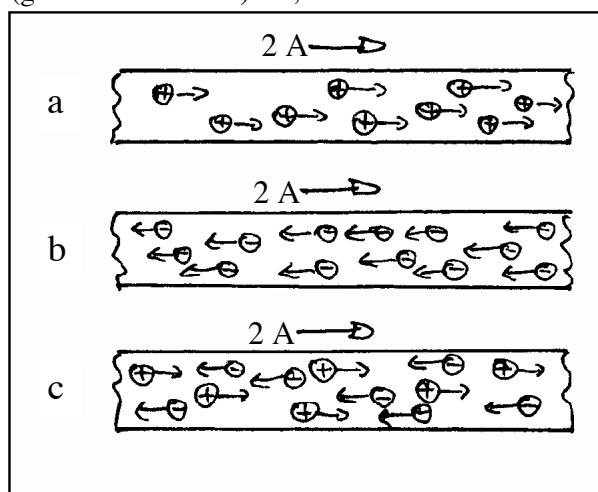


Fig. 19.1. Una corrente che fluisce verso destra può originare da portatori di carica che si muovono (a) verso destra, (b) verso sinistra o (c) in entrambe le direzioni.

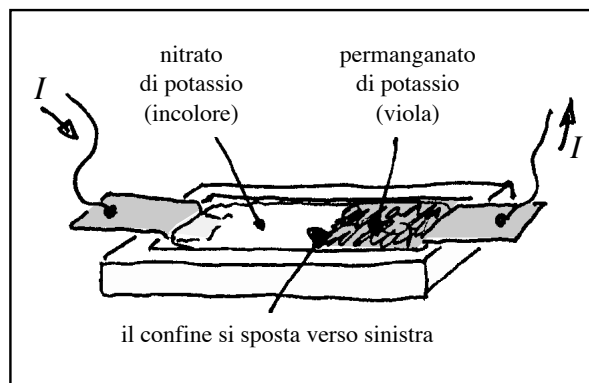


Fig. 19.2. Se nella soluzione scorre una corrente elettrica, il confine tra il permanganato di potassio (viola) e il nitrato di potassio (incolore) si sposta.

Il movimento dei portatori di carica può anche essere evidenziato. Facciamo passare una corrente elettrica attraverso una soluzione salina, fig. 19.2. In una bacinella si trovano a sinistra una soluzione di nitrato di potassio e a destra una soluzione di permanganato di potassio. La soluzione di sinistra è chiara e trasparente, quella di destra è viola. La colorazione della soluzione di permanganato di potassio è dovuta alla presenza di ioni negativi di permanganato. Ora, se scorre una corrente tutti gli ioni, compresi quelli di permanganato, cominciano a muoversi. Il moto degli ioni di permanganato causa uno spostamento del confine tra la soluzione incolore e quella viola, spostamento visibile anche a occhio nudo. Se la corrente (in fig. 19.2) scorre da sinistra verso destra, gli ioni si spostano verso sinistra, se la corrente scorre verso sinistra gli ioni si spostano verso destra.

Esercizi

1. In una soluzione salina, nella quale sono immersi due elettrodi, gli ioni positivi scorrono da sinistra verso destra. Trasportano $0,5 \text{ coulomb}$ al secondo. Contemporaneamente scorrono anche degli ioni negativi da destra verso sinistra. Ogni secondo portano $0,3 \text{ coulomb}$ da destra verso sinistra. In che direzione scorre la corrente elettrica? Che intensità ha?

2. In un filo di rame scorre una corrente elettrica di 2 A . Quanti elettroni al secondo attraversano una sezione del conduttore?

19.3 L'accumulazione di carica elettrica

Il nostro desiderio era scoprire qualcosa riguardo alle proprietà dell'elettricità. Poi abbiamo capito perché un normale circuito è elettricamente neutro, perché normalmente la carica elettrica non si nota. Ora vogliamo provare ad alterare la neutralità del conduttore elettrico. Vogliamo tentare di accumulare carica elettrica in modo da rendere la carica totale diversa da zero. Come vedremo è abbastanza difficile.

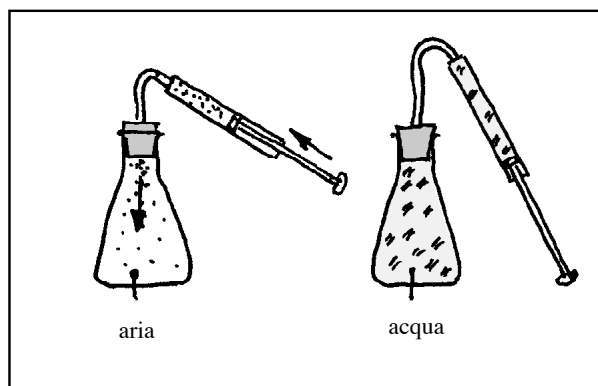


Fig. 19.3. La quantità d'aria nel recipiente di sinistra è facile da aumentare, la quantità d'acqua in quello di destra no.

Per capire meglio il problema da affrontare osserviamo la fig. 19.3. Il recipiente di sinistra è riempito d'aria a pressione normale. Vogliamo aumentare la quantità d'aria nel recipiente. Non dobbiamo fare altro che pompare aria dall'esterno fin dentro il recipiente. In questo processo la pressione aumenta. Il recipiente di destra in fig. 19.3 è pieno d'acqua e vogliamo aumentare la quantità d'acqua. Ma non è così facile come con l'aria. Anche con pompe che generano pressioni molto elevate la quantità d'acqua nel recipiente aumenterà di pochissimo. Dipende dal fatto che l'acqua non è facilmente comprimibile come lo è l'aria.

L'elettricità si comporta piuttosto come l'acqua. È molto difficile causare una variazione della quantità di elettricità presente in un oggetto (di norma 0 coulomb).

In che modo potremmo accumulare elettricità in un oggetto? Naturalmente con un "pompa di elettricità", cioè una batteria o un alimentatore. La fig. 19.4 mostra un tentativo fallito: il polo positivo di una batteria viene collegato a un filo, il polo negativo a terra. Così la batteria dovrebbe pompare elettricità da terra e spingerla nel filo. Il filo dovrebbe caricarsi elettricamente e rimanere carico anche dopo averlo staccato dalla batteria. Mettendo in contatto il filo con uno dei collegamenti di una lampadina (il cui altro collegamento sia messo a terra), quest'ultima si dovrebbe accendere, visto che l'elettricità accumulata nel filo può defluire a terra solo attraverso la lampadina. Ma la lampadina non si accende. Per-

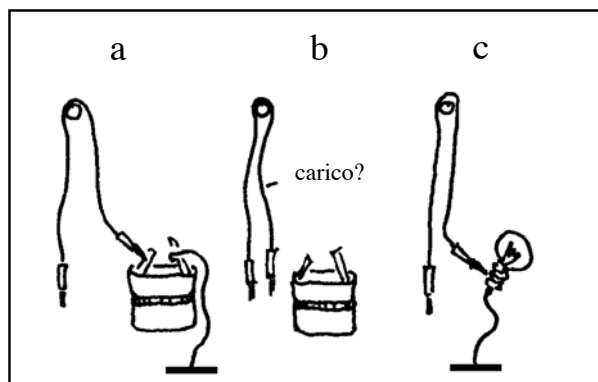


Fig. 19.4. (a) La batteria pompa elettricità da terra nel filo. (b) il filo è elettricamente carico. (c) La lampadina non si accende perché la carica sul filo è troppo poca.

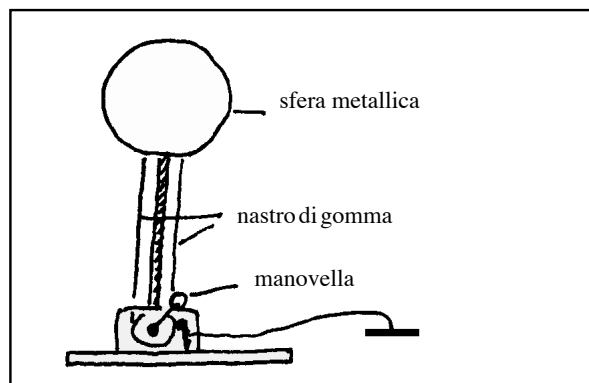


Fig. 19.5. Generatore elettrostatico.

ché? Perché la quantità di elettricità che abbiamo pompato nel filo è decisamente troppo piccola.

Prima di poter provare l'accumulo di carica nel filo dobbiamo migliorare tre aspetti dell'esperimento:

(1) Usare una "pompa di elettricità che spinge più forte", cioè un alimentatore che generi una tensione molto più alta. Si parla di comuni strumenti per generare alte tensioni: gli alimentatori ad alta tensione (con un trasformatore) o un generatore elettrostatico, fig. 19.5. Il generatore elettrostatico genera tensioni fino a 50 kV.

(2) Sostituire la lampadina a incandescenza con una fluorescente, molto più sensibile e adatta a percepire la piccola carica sul filo. Una lampada fluorescente ha anche il vantaggio di evidenziare la direzione di scorrimento della corrente: si accende sempre dalla parte dove il potenziale è inferiore.

(3) Appendere il filo a un isolatore. L'isolamento normale del filo, di plastica, non tratterrebbe la carica accumulata che potrebbe defluire a terra attraverso il tavolo.

Dopo aver preso queste misure l'esperimento di accumulazione di carica riesce. La quantità d'elettricità del filo aumenta o diminuisce a seconda del collegamento dell'alimentatore che viene messo a terra. Se viene messo a terra il polo negativo dell'alimentatore, fig. 19.6, il filo si carica positivamente. Visto che i portatori mobili del filo sono gli elettroni, questo significa che nel filo mancano elettroni. Ha meno elettroni di quando è neutro. Se il polo positivo è messo a terra e il polo negativo è collegato al filo, quest'ultimo diventa negativo. C'è un eccesso di elettroni.

Se portiamo il filo a un potenziale più alto la quantità di carica accumulata è maggiore. Un potenziale positivo ed elevato coincide con una (relativamente) grande quantità di carica positiva, a un potenziale negativo corrisponde una grande quantità di carica negativa. Riassumiamo questi risultati:

Più il potenziale elettrico di un corpo è alto, più carica elettrica contiene.

Vale anche al contrario:

Più carica elettrica c'è su un corpo, più alto sarà il suo potenziale.

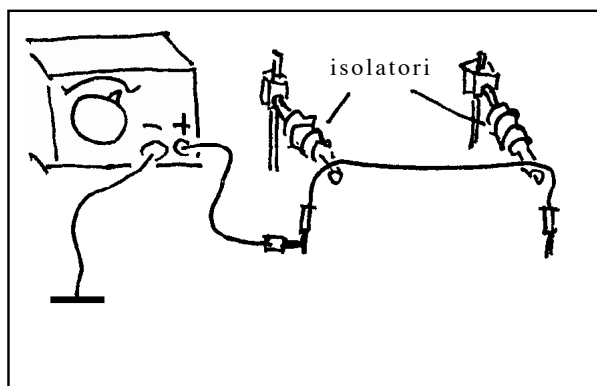


Fig. 19.6. Il filo è carico positivamente. C'è carenza di elettroni.

19.4 Il campo elettrico

Abbiamo potuto accumulare carica e anche dimostrarne la presenza, ma non abbiamo ancora notato nessuna proprietà particolare della carica. Per analizzare le proprietà dell'elettricità, eseguiamo l'esperimento descritto in fig. 19.7. Due sfere metalliche A e B vengono collegate a un alimentatore ad alta tensione. La sfera B è molto leggera. È appesa a un filo sottile e libera di oscillare. Se accendiamo l'alimentatore in modo che su una sfera ci sia carica positiva e sull'altra carica negativa, la sfera B viene attratta dalla sfera A. Se invertiamo la polarità, cioè carica negativa alla sfera che aveva carica positiva e positiva a quella che ne aveva di negativa, non cambia niente: B viene ancora attratta da A.

Ora colleghiamo le sfere all'alimentatore in modo che abbiano carica dello stesso segno, fig. 19.8. Ora B viene respinta da A. Non conta che le sfere abbiano entrambe carica positiva o negativa.

Dal fatto che una sfera attira l'altra, concludiamo che tra le sfere ci deve essere un collegamento.

Questo collegamento viene detto *campo elettrico*.

Oggetti elettricamente carichi sono circondati da un campo elettrico. Se le cariche di due oggetti hanno lo stesso segno il campo respinge gli oggetti l'uno dall'altro, se hanno segno opposto il campo li attira l'uno verso l'altro.

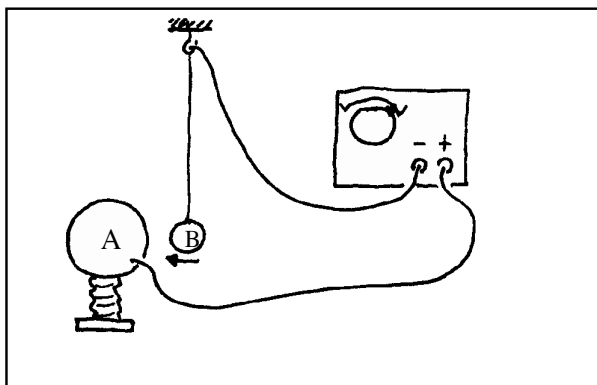


Fig. 19.7. La sfera B viene attratta dalla sfera A grazie al campo elettrico.

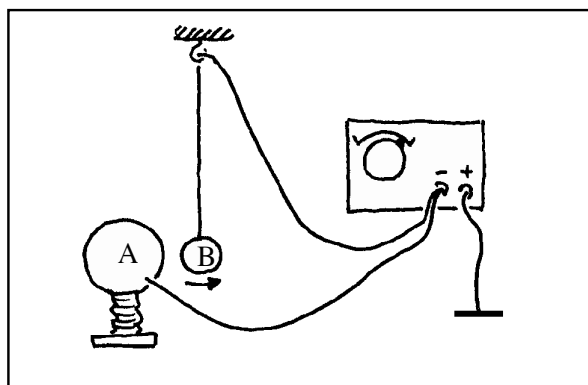


Fig. 19.8. La sfera B viene respinta dalla sfera A grazie al campo elettrico.

Infine facciamo un altro esperimento, ancora più semplice del precedente, fig. 19.9: solo la sfera fissa A viene caricata elettricamente, la sfera B viene appesa e isolata. Sorprendentemente anche questa volta B è attratta da A. Indipendentemente dal fatto che la carica di A sia positiva o negativa. Come si spiega? Visto che la sfera appesa non è collegata all'alimentatore non dovrebbe avere un campo.

Troviamo la spiegazione ricordandoci di fenomeni analoghi del magnetismo: un pezzo di ferro dolce, cioè un oggetto inizialmente non magnetizzato, viene attratto da un polo magnetico, sia da un polo nord che da un polo sud. In quel caso la spiegazione era: appena lo si mette vicino a un polo magnetico, il ferro dolce forma dei poli. Vicino a un polo nord, sul lato rivolto al polo forma un polo sud e sul lato opposto un polo nord, fig. 19.10.

Nel nostro ultimo esperimento succede la stessa cosa. Il campo elettrico attira i portatori di carica di B e li sposta un po', cosicché B si carica positivamente su un lato e negativamente su quello opposto. La carica totale di B resta nulla. Se la carica di A è positiva, B diventa negativa sul lato rivolto verso A e positiva sul lato opposto. Visto che il lato negativo di B è più vicino ad A rispetto al lato positivo, la sfera B viene attratta dalla sfera A.

Se A è negativa, le cariche di B si spostano nella direzione opposta e il lato di B rivolto verso A e A han-

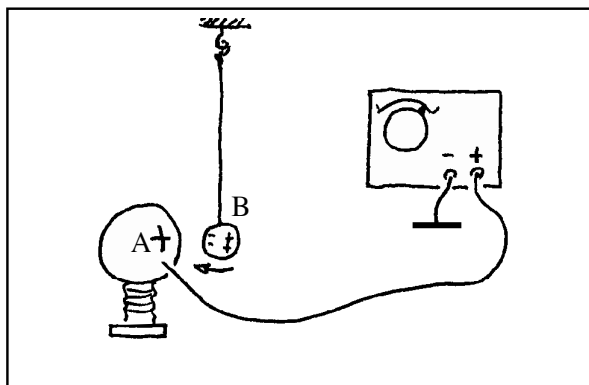


Fig. 19.9. I portatori di carica mobili di B sono spostati dal campo elettrico. Sulla superficie di B si formano dei settori elettricamente carichi.

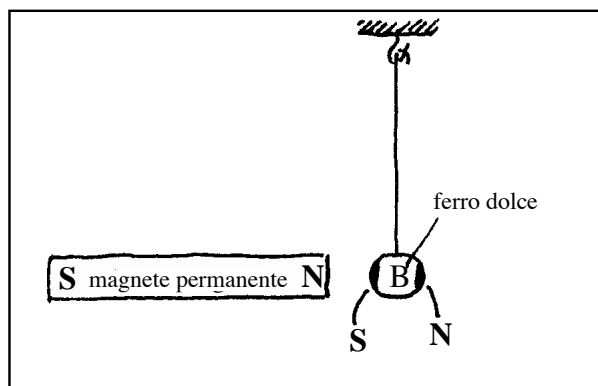


Fig. 19.10. B viene magnetizzata dal campo magnetico. Sulla superficie di B si formano dei poli magnetici.

no ancora carica opposta, quindi B è ancora attratta da A.

Questo processo di spostamento della carica sotto l'influsso del campo elettrico di un altro corpo viene detto *influenza elettrostatica*.

Finora potevamo dimostrare la presenza di carica elettrica su un oggetto solo grazie a una lampadina fluorescente. Un altro strumento sensibile alla presenza di elettricità è l'*elettroscopio*. Ora siamo in grado di capirne il funzionamento.

All'interno dell'anello, fig. 19.11, c'è una sbarra verticale. La sbarra è elettricamente isolata dall'anello. Su questa sbarra ne è montata un'altra grazie a un perno che le permette di ruotare. Questa seconda sbarra è molto leggera ed è in contatto elettrico con la sbarra fissa. Entrambe le sbarre sono in contatto elettrico con la piattaforma che sta in cima all'elettroscopio. L'anello viene messo a terra.

Vogliamo servirci dell'elettroscopio per dimostrare la presenza di carica sulla sfera. A questo scopo la piattaforma dell'elettroscopio viene toccata con la sfera. Dalla sbarra alle sbarre scorre carica elettrica. Le sfere si ritrovano caricate con lo stesso segno e la sbarra mobile viene respinta dal campo della sbarra fissa. Più carica c'è sull'elettroscopio, più la sbarra mobile si divarica rispetto a quella fissa.

Usiamo l'elettroscopio in un semplice esperimento che mostri nuovamente il fenomeno dell'influenza elettrostatica, fig. 19.12.

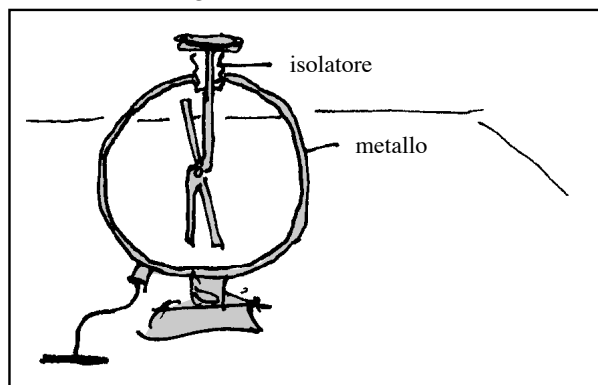


Fig. 19.11. Elettroscopio. La sbarra mobile porta carica dello stesso segno di quella fissa.

La sfera grande è stata caricata positivamente. Portiamo due piccole sfere neutre B e C nel campo della sfera grande, fig. 19.12a. B e C sono in contatto tra loro ma non toccano A, fig. 19.12b. A causa del campo della sfera A le cariche di B e C vengono separate. A sinistra su B si accumula carica negativa e a destra su C si concentra la carica positiva. Ora separiamo B e C, quando sono ancora vicine ad A, fig. 19.12c. Poi le allontaniamo dalla sfera grande, fig. 19.12d. Ora le cariche su B e C vorrebbero neutralizzarsi di nuovo, ma non possono perché il collegamento è interrotto.

Per dimostrare la presenza della carica su B e C usiamo l'elettroscopio. Tocchiamo l'elettroscopio con una delle due sfere, per esempio con B. Da B all'elettroscopio scorre carica negativa, l'elettro-

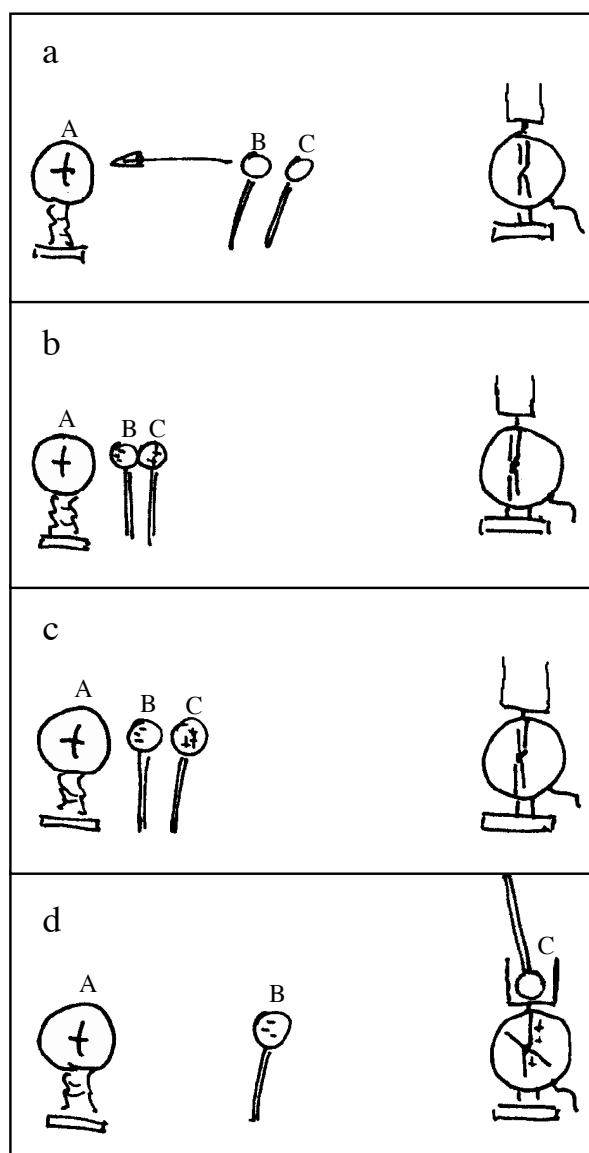


Fig. 19.12.

- Le sfere neutre B e C vengono avvicinate alla sfera A.
- Le cariche di B e C si separano per influenza.
- Il contatto tra B e C viene interrotto.
- Con l'oscilloscopio si verifica la presenza di carica su C.

scopio reagisce divaricando le sbarre. Poi tocchiamo l'elettroscopio con la sfera C. Ora scorre carica positiva che neutralizza quella negativa già presente. Le sbarre tornano nella posizione iniziale.

Esercizi

1. Sulla sfera B in fig. 19.9 i portatori di carica negativa e positiva vengono separati dall'influenza. La sfera viene attratta dal campo della sfera A. Non appena tocca A viene respinta. Come si spiega?
2. Come si può dimostrare che la struttura che circonda un oggetto elettricamente carico non è un campo magnetico?
3. Una sfera metallica leggera A è appesa tra due sfere fisse, fig. 19.13. Tocchiamo brevemente B con la sfera A e poi la lasciamo andare. Cosa succede?

19.5 Il condensatore

Abbiamo caricato elettricamente fili e sfere di metallo. Malgrado l'elevato potenziale non siamo mai riusciti ad accumulare molta carica. Non abbiamo ancora studiato la dipendenza della quantità di carica da forma e dimensione del corpo carico. Ora dobbiamo farlo. Il nostro scopo è scoprire come immagazzinare la maggiore quantità di carica possibile.

La nostra prima constatazione è che la carica elettrica sta solo sulla superficie esterna di un corpo carico. Lo si capisce dal fatto che, allo stesso potenziale, una sfera piena e una cava, fig. 19.14, portano la stessa quantità di carica. Per contro su una sfera grande c'è molta più carica che su una sfera piccola. Quindi per immagazzinare molta carica dobbiamo usare un oggetto con molta superficie esterna.

C'è un altro metodo molto più efficace per aumentare la quantità di carica accumulata: avvicinare il corpo dal quale si preleva la carica al corpo sul quale la si accumula. Più i corpi sono vicini, più carica contengono a potenziale costante. L'effetto massimo si ottiene se i corpi hanno la forma di una piastra e se la distanza tra i corpi è molto piccola. Il campo attira le

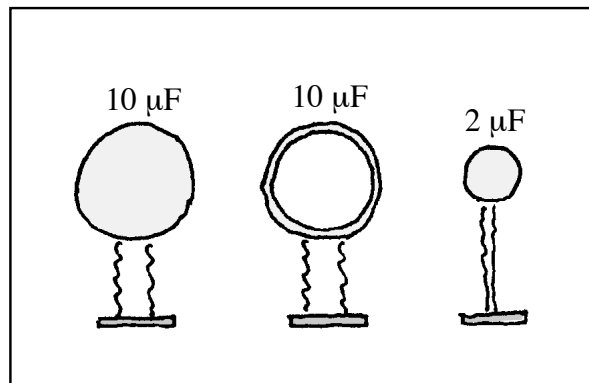


Fig. 19.14. Allo stesso potenziale, su una sfera cava e su una piena c'è la stessa quantità di elettricità, mentre su una piccola ce n'è meno che su una grande.

cariche sulle piastre, di conseguenza su ogni piastra le cariche si trovano solo sulla faccia rivolta verso l'altra piastra. Se una delle due piastre è messa a terra, la quantità di carica rimane invariata, fig. 19.15. Un apparecchio per immagazzinare carica elettrica come questo, viene detto *condensatore*.

Facciamo un esperimento per dimostrare che un condensatore riesce a contenere più carica se si riduce la distanza tra le piastre. Usiamo un condensatore con la distanza tra le piastre regolabile. Una piastra, per esempio quella carica negativamente, viene messa a terra. Carichiamo il condensatore quando le piastre sono lontane e in seguito lo scarichiamo attraverso una lampadina fluorescente. Ripetiamo l'esperimento più volte, diminuendo progressivamente la tensione dell'alimentatore, fig. 19.16. A un certo punto la carica sul condensatore è così poca da rendere impercettibile l'accendersi della lampadina. A questo punto avviciniamo molto le piastre - circa 2 mm - e ripetiamo l'esperimento con l'ultimo valore di tensione. La lampadina si accende nuovamente. Quindi alla stessa tensione sul condensatore c'è più carica quando la distanza tra le piastre è piccola.

Minore è la distanza tra le piastre di un condensatore, maggiore sarà la quantità di carica immagazzinata.

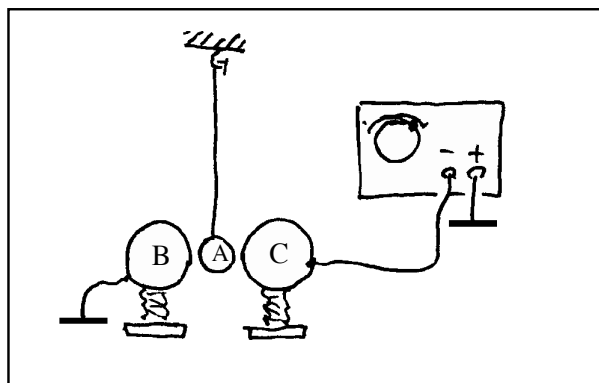


Fig. 19.13. Per l'esercizio 3

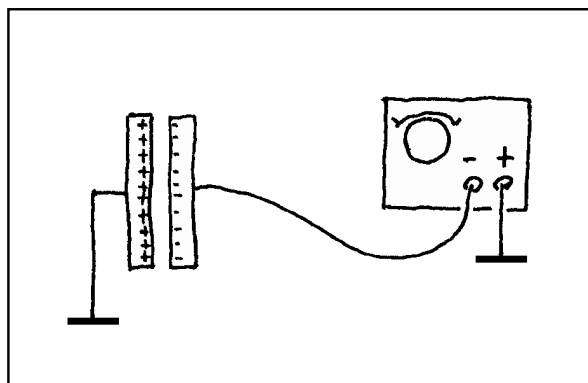


Fig. 19.15. Condensatore. Due piastre metalliche molto vicine l'una di fronte all'altra. La carica sulle piastre ha segno opposto.

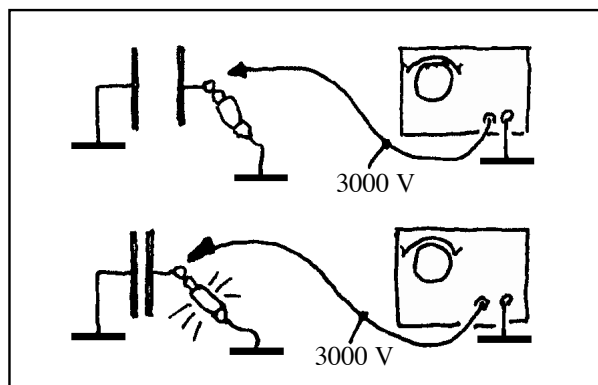


Fig. 19.16. Una diminuzione della distanza tra le piastre causa un aumento della carica presente sulle piastre.

In un condensatore tecnico la distanza tra le piastre è ancora minore e la loro superficie ancora maggiore di quelle del condensatore che abbiamo usato nell'esperimento. Si possono per esempio arrotolare in forma cilindrica due sottili strati di alluminio rivestiti da due sottili strati di isolatore, fig. 19.17.

Su un condensatore tecnico ci può essere così tanta carica da rendere molto facile dimostrarne la presenza. Costruiamo un circuito come in fig. 19.18 (nota il simbolo tecnico che rappresenta il condensatore). Il condensatore viene caricato collegandolo a un alimentatore a 6 V. Poi si allaccia al condensatore un piccolo motore elettrico. Il motore gira per un paio di secondi.

Questo esperimento mostra a cosa possono servire i condensatori: per immagazzinare energia. Caricando le piastre con elettricità, tra le piastre si forma un campo elettrico che, esattamente come il campo magnetico, contiene energia. Mentre il condensatore si carica, dall'alimentatore arriva energia. Quando il condensatore si scarica questa energia viene ceduta al motore.

Il condensatore può assolvere alla stessa funzione dell'accumulatore: immagazzinare energia. Riceve energia con il portatore elettricità mentre si carica e quando si scarica la cede con lo stesso portatore. Si distingue dall'accumulatore per due aspetti: con un condensatore si può mettere e togliere energia molto più in fretta che con un accumulatore. Per contro un accumulatore può contenere molta più energia di un condensatore.

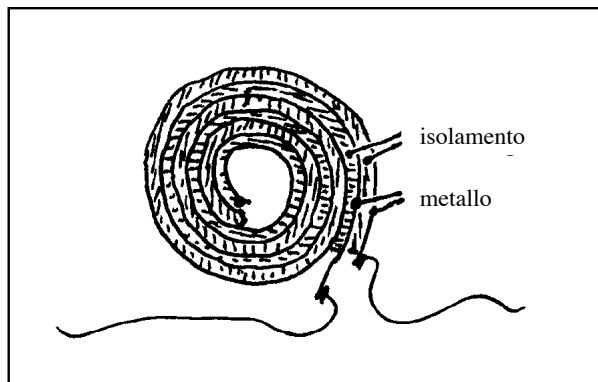


Fig. 19.17. Sezione di un condensatore a foglio metallico.

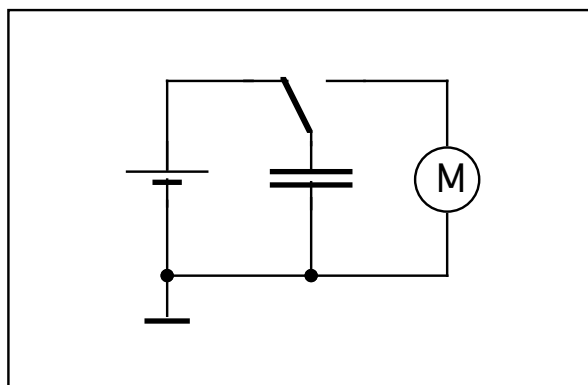


Fig. 19.18. Il condensatore come contenitore di energia.

19.6 La capacità

Vogliamo capire quanta carica elettrica si trova sulle piastre di un condensatore. Durante la carica la tensione tra le piastre aumenta. Carichiamo il condensatore fino al massimo di tensione permessa. (Il valore massimo è stampato sul condensatore. Se lo si supera tra le piastre può esserci una scarica.)

Carichiamo il condensatore con un alimentatore che fornisce una corrente di intensità costante. Per calcolare la quantità di elettricità immagazzinata, usiamo la seguente formula:

$$Q = I \cdot t$$

Conosciamo l'intensità I della corrente di carica e misuriamo il tempo necessario t . Poi calcoliamo la quantità di elettricità Q presente sulle piastre alla fine del processo di carica. Più precisamente: Q rappresenta la carica della piastra positiva. Sulla piastra negativa c'è la carica $-Q$.

Esempio: il condensatore viene caricato fino a una tensione di 6 V. L'intensità della corrente durante la carica è 10 mA. La carica dura 6 secondi. La quantità di elettricità sulle piastre è

$$Q = I \cdot t = 10 \text{ mA} \cdot 6 \text{ s} = 60 \text{ mC.}$$

Scarichiamo il condensatore e lo ricarichiamo ma solo fino a metà della tensione precedente. Costatiamo che ci vuole metà del tempo. Quindi sulle piastre c'è metà della carica elettrica. Concludiamo che la quantità di elettricità sulla piastra è proporzionale alla tensione elettrica tra le piastre, fig. 19.19:

$$Q \sim U.$$

Possiamo ricavare la stessa relazione anche in un altro modo. Riportiamo in un diagramma la carica sulle piastre in funzione del tempo durante il processo di carica. Visto che la corrente di carica è costante la quantità di carica aumenta regolarmente con il tempo: Q è una funzione lineare del tempo, fig. 19.20a. Rappresentiamo poi la tensione tra le piastre del condensatore durante il processo di carica, ancora in funzione del tempo: otteniamo ancora una funzione lineare, fig. 19.20b. Il confronto tra la fig. 19.20a e la fig. 19.20b dimostra che anche U è una funzione lineare di Q .

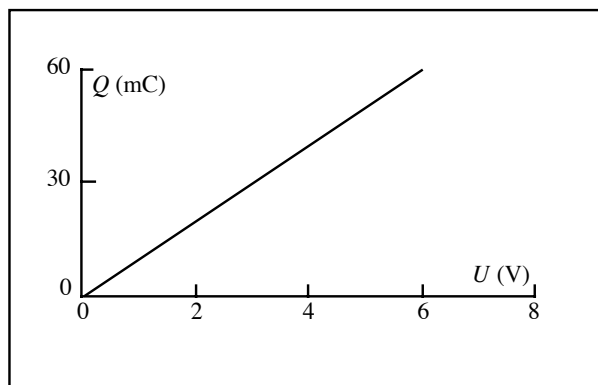


Fig. 19.19. Carica sulle piastre di un condensatore in funzione della tensione tra le piastre.

Dire che $Q \sim U$ equivale a dire che il quoziente Q/U è costante. Questo quoziente viene detto capacità C del condensatore:

$$C = \frac{Q}{U}$$

Se un condensatore A ha una capacità doppia di un condensatore B, allora alla stessa tensione sul condensatore A c'è il doppio di carica rispetto al condensatore B.

Il valore della capacità è stampato sui condensatori tecnici. Dall'equazione segue che l'unità di misura della capacità è il coulomb/volt. Per questa unità si usa l'abbreviazione farad (F). Quindi $1 \text{ C/V} = 1 \text{ F}$.

Il farad è un'unità molto grande. La capacità dei condensatori tecnici normalmente spazia dai nanofarad ai millifarad.

Esempio: nel nostro esempio la carica elettrica del condensatore era di 60 mC quando la tensione tra le piastre del condensatore era di 6 V. Per la capacità del condensatore otteniamo:

$$C = Q/U = 60 \text{ mC}/6 \text{ V} = 10 \text{ mF}.$$

La tensione U tra le piastre di un condensatore è proporzionale alla carica elettrica Q presente sulle piastre. Il quoziente Q/U viene detto capacità del condensatore.

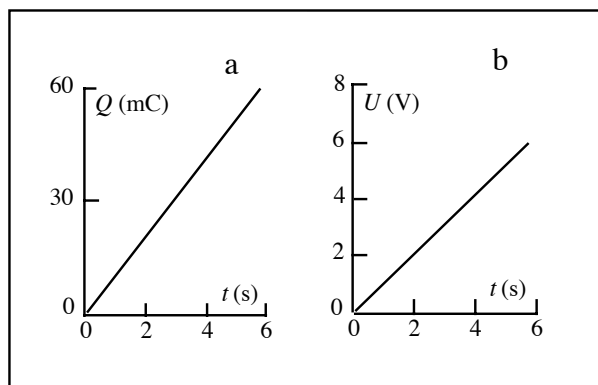


Fig. 19.20. Quantità di carica e tensione in funzione del tempo durante la carica di un condensatore.

Esercizi

1. Un condensatore viene caricato con una corrente elettrica costante di 2 mA fino a quando la tensione tra le sue piastre raggiunge i 240 V. La carica dura 2 minuti.

(a) Quanta carica elettrica c'è sulle piastre alla fine del processo di carica?

(b) Qual è la capacità del condensatore?

2. Tra le piastre di un condensatore da $80 \mu\text{F}$ c'è una tensione di 150 V. Quanta carica elettrica c'è sulle piastre?

19.7 Il tubo catodico

“Tubo catodico” è il termine tecnico che designa lo schermo di un televisore, di un oscilloscopio o di molti computer. Si chiama anche tubo a fascio elettronico, visto che nel tubo, un contenitore di vetro pompato a vuoto, c'è un cosiddetto cannone elettronico dove viene prodotto un fascio di elettroni, fig. 19.21. Questo fascio di elettroni è molto sottile. Nel punto dove colpisce lo schermo genera una piccola macchia luminosa. Il fascio può essere deviato in modo da colpire qualsiasi punto dello schermo.

Affinché sullo schermo appaia un'immagine, il fascio è spostato rapidamente lungo delle linee attraverso lo schermo. La sua intensità viene adattata alla luminosità dell'immagine nel punto dove si trova il fascio in quel momento. In un televisore il fascio copre tutto lo schermo 25 volte al secondo. Così si ha la sensazione di vedere un'immagine animata in modo fluido.

Guardiamo meglio come è fatto un tubo catodico. La fig. 19.22 mostra schematicamente un cannone elettronico.

Il catodo incandescente: da un filo incandescente fuoriescono elettroni. Di solito però questi elettroni non si allontanano molto dal filo, visto che, usciti gli elettroni, il filo si carica positivamente e gli elettroni negativi vengono trascinati indietro verso il filo. Quindi ogni filo incandescente di una lampadina a incandescenza è circondato da una sottile pellicola di elettroni. Si sfrutta questo effetto per generare il

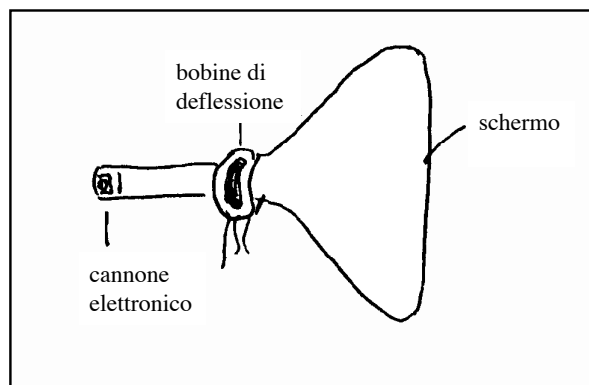


Fig. 19.21. Tubo catodico.

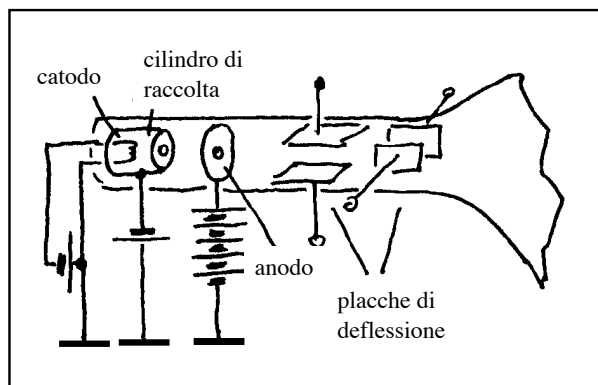


Fig. 19.22. Costruzione di un cannone elettronico.

fascio nel tubo catodico, dove ci sono i cosiddetti catodi incandescenti, dei fili sottili riscaldati elettricamente.

L'anodo: gli elettroni che escono dal catodo devono formare un fascio. Innanzitutto devono allontanarsi dal catodo. Lo fanno grazie a un anodo, una piccola piastra metallica che si trova a un potenziale positivo elevato, quindi carica positivamente. Il campo elettrico attira gli elettroni che si allontanano dal catodo e vengono accelerati in direzione dell'anodo. Lo raggiungono a velocità molto alta: circa 100 000 km/s. Però gli elettroni non devono colpire l'anodo, ma lo schermo. Perciò l'anodo ha un piccolo foro al centro che gli elettroni possono attraversare.

Il cilindro di raccolta: senza di lui gli elettroni non formerebbero un fascio ma uscirebbero dal catodo un po' come l'acqua dalla doccia o la luce da una lampada da ufficio. Il potenziale del cilindro di raccolta è più basso di quello del catodo. Quindi è caricato negativamente e comprime gli elettroni nel mezzo, il fascio elettronico viene focalizzato.

Le placche di deflessione: per muovere il fascio sullo schermo si possono usare le cosiddette placche di deflessione. Sono poste dopo l'anodo, ma ancora nella parte stretta del tubo. Una coppia di placche causa la deviazione in direzione orizzontale, un'altra in direzione verticale. Si ottiene la deviazione applicando una tensione tra le placche. Si caricano con segni opposti e generano un campo elettrico che devia gli elettroni verso l'alto, verso il basso o di lato.

La bobina di deflessione: invece delle placche si può usare una bobina per deviare il fascio. Il fascio di elettroni è una corrente elettrica. Questa corrente può essere deviata con il campo magnetico di una bobina. Deviare un fascio di elettroni con un campo magnetico è molto più facile che non muovere un filo attraversato da una corrente, in quanto gli elettroni sono molto più leggeri di un filo. Il fascio elettronico di un televisore pesa solo circa 10^{-23} kg.

Il tubo catodico di un televisore a colori non ha un solo cannone elettronico, come quello di un televi-

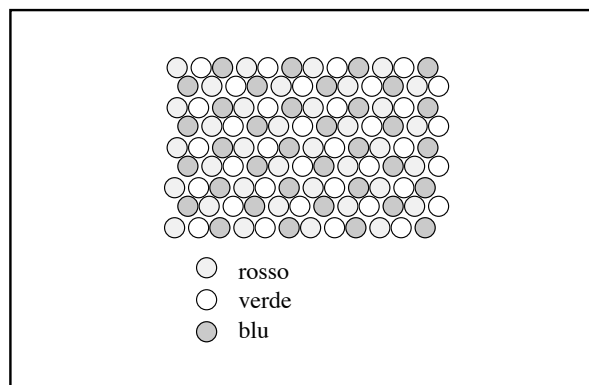


Fig. 19.23. Ogni punto di un'immagine su uno schermo di televisore è composto da un punto luminoso che può accendersi di rosso, da uno verde e da uno blu.

sore in bianco e nero, ma ne ha tre. Sullo schermo ci sono moltissimi punti luminosi in gruppi di tre, fig. 19.23. Ogni gruppo è composto da un punto che, quando colpito dal fascio di elettroni, emette luce rossa, da uno che emette luce verde e da un punto che la emette blu. Prima dello schermo c'è una maschera perforata che separa i fasci dei vari cannoni elettronici: uno colpisce solo i punti rossi, un altro solo quelli verdi e il terzo quelli blu. La luminosità di ognuno dei tre colori è regolata dall'intensità del corrispondente fascio di elettroni.

Se osserviamo uno schermo molto da vicino vediamo i diversi punti rossi, verdi e blu. Se ci allontaniamo dallo schermo non distinguiamo più i singoli punti ma percepiamo una mescolanza. Modificando la luminosità dei tre tipi di punti luminosi si può simulare qualsiasi colore a una certa distanza. Se per esempio i punti rosso, verde e blu sono molto luminosi vediamo bianco. Se si accendono solo il punto rosso e quello verde vediamo giallo.

Esercizi

1. Gli elettroni in un tubo catodico vengono accelerati con una tensione di 20 000 V. Il fascio elettronico ha un'intensità di 0,2 mA. Qual è l'intensità della corrente di energia degli elettroni che colpiscono lo schermo?
2. Avvicinati allo schermo di un televisore acceso. Quali sono i punti accesi quando si ha la sensazione di vedere: rosso, verde, giallo, turchese, arancione, nero, bianco e marrone?

19.8 L'elettricità atmosferica

Se teniamo un cavo messo a terra vicino a un generatore elettrostatico "scatta una scintilla". Detto con maggior precisione ecco cosa succede: nell'aria c'è sempre una piccola quantità di ioni. Questi ioni vengono accelerati talmente nel campo molto intenso tra la fine del cavo e la sfera da ionizzare le molecole d'aria quando collidono con esse. Questi nuovi ioni ionizzano altre molecole e così via. In questo modo si forma un "tubo" di aria ionizzata che conduce l'elettricità e emette luce. La sfera si scarica attraverso questo tubo.

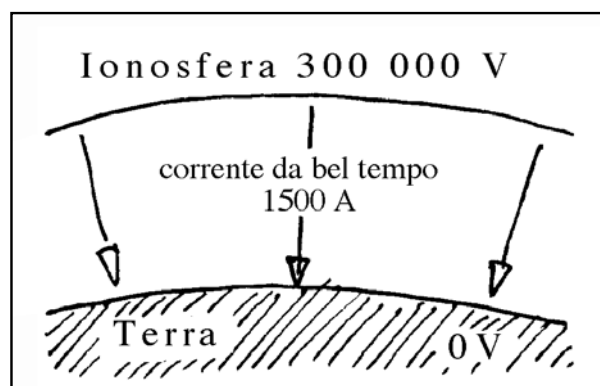


Fig. 19.24. Il potenziale elettrico della ionosfera supera di circa 300 000 volt quello della Terra. Quando il tempo è bello dalla ionosfera alla Terra fluisce una corrente elettrica di circa 1500 A.

In un temporale vediamo lo stesso fenomeno in forma più impressionante: il lampo. Anche in questo caso l'aria viene ionizzata, tra il suolo e una nuvola carica. La tensione è molto più alta rispetto al generatore elettrostatico, nell'ordine dei milioni di volt.

Nell'atmosfera l'elettricità circola in modo curioso. Per capire questo circuito e per capire i processi che avvengono in un temporale dobbiamo occuparci dapprima dell'atmosfera quando il tempo è bello.

La conducibilità elettrica dell'aria a livello del suolo è molto piccola. Però aumenta salendo, in quanto il numero di ioni e la loro mobilità aumenta fortemente con l'altezza. Per semplificare possiamo dire che l'aria a circa 50 km di altitudine forma uno strato di buon conduttore. Questo strato viene chiamato ionosfera. (La pressione atmosferica è ridotta a 1/1000 della pressione a livello del suolo.) La ionosfera e la superficie terrestre formano per così dire le piastre di un gigantesco condensatore.

La ionosfera si trova in permanenza a un potenziale di circa 300 000 V. Tra essa e la superficie c'è uno strato d'aria che ha una resistenza di circa 200 Ω . La differenza di potenziale tra il margine inferiore della ionosfera e la superficie terrestre genera una corrente elettrica in direzione verticale di circa 1500 A, fig. 19.24.

Di questa corrente da bel tempo non notiamo la presenza perché si distribuisce su tutta la Terra. La conseguenza di questa corrente sarebbe un rapido scaricarsi della ionosfera, la tensione scomparirebbe in poco più di mezz'ora. Le nuvole temporalesche fanno in modo che non succeda.

Possiamo immaginare una nuvola temporalesca come un'enorme pompa di elettricità, una specie di batteria o generatore elettrico. Come funziona lo vedremo più avanti. Per ora occupiamoci del suo ruolo nel circuito atmosferico, fig. 19.25. La nuvola temporalesca pompa elettricità dal basso verso l'alto. Sul margine inferiore il potenziale è fortemente negativo e sul margine superiore fortemente positivo.

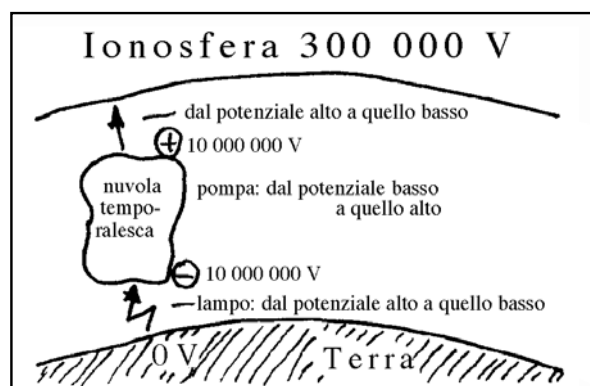


Fig. 19.25. Le nubi temporalesche pompano in continuazione elettricità dalla Terra alla ionosfera.

Visto che l'aria sopra la nuvola conduce abbastanza bene l'elettricità, dal "collegamento" superiore della nuvola scorre una corrente elettrica verso la ionosfera: dal potenziale elevato (alcuni milioni di volt) a quello più basso (300 000 V).

Inoltre ci deve essere una corrente dalla Terra al "collegamento" inferiore della nuvola, cioè dal potenziale più alto (0 V) a quello più basso (alcuni milioni di volt negativi). Ma sotto la nuvola l'aria è un cattivo conduttore e la corrente può scorrere solo con i lampi. Quindi i lampi sono il conduttore inferiore della nostra pompa di elettricità.

Ma come funziona la pompa stessa? Cosa succede in una nuvola temporalesca? Le goccioline e i cristalli di ghiaccio sono elettricamente carichi. Di preferenza le particelle più piccole portano carica positiva, quelle più grandi carica negativa. Nel complesso, facendo la media di tutte le particelle, la nuvola è inizialmente neutra. Nella nuvola si svolgono processi che separano le particelle grandi da quelle piccole. Così anche le cariche positive sono separate dalle negative e viene generata una differenza di potenziale.

Il forte vento ascensionale all'interno della nuvola è responsabile della separazione delle particelle a dipendenza delle dimensioni: quelle piccole vengono portate più in alto, con la loro carica elettrica: le gocce più grosse, o i chicchi di grandine, cadono come precipitazione. Il potenziale della nuvola diventa positivo in alto e negativo in basso.

La carica della ionosfera grazie alle nuvole temporalesche non è un processo che succede solo di tanto in tanto. Possiamo immaginare la ionosfera come un'unica, gigantesca piastra di un condensatore, e alla sua carica contribuiscono tutte le nuvole temporalesche del pianeta. In ogni istante sulla Terra ci sono circa 2000 temporali con circa 100 lampi al secondo. La pompa di elettricità che ricarica la ionosfera funziona in permanenza.

20. La tecnica dei dati

20.1 L'amplificatore

Per ogni tipo di trasporto ci vuole energia. L'auto-carro che trasporta i mattoni dalla fabbrica al cantiere consuma del carburante e quindi energia. Affinché l'acqua scorra nelle tubazioni, e il petrolio negli oleodotti, ci vogliono delle pompe, e le pompe consumano energia. Dove va a finire questa energia usata nei trasporti? Causa ogni volta un certo riscaldamento lungo il percorso del trasporto: viene prodotta entropia. Assieme a questa entropia anche l'energia si distribuisce nell'ambiente circostante in modo tale che alla fine non ci si accorge della sua presenza.

Anche per il trasporto di dati ci vuole energia. Nella maggior parte dei casi questa energia viene emessa dalla sorgente di dati, in un certo senso fa da apripista ai dati. Così le onde sonore prodotte da un altoparlante, le onde elettromagnetiche emesse da una antenna o la luce proveniente dallo schermo di un televisore, oltre ai dati portano energia.

Ora possiamo completare il simbolo grafico che rappresenta una sorgente di dati, fig. 20.1.

In questo esempio l'energia e i dati hanno lo stesso portatore.

In alcuni trasporti di dati si spreca parecchia energia: quella emessa dalla sorgente viene distribuita su una superficie sempre più grande, fig. 20.2. Questo vale per il suono prodotto da un altoparlante o da una persona che parla, ma anche per le onde elettromagnetiche emesse da un'antenna radio o televisiva in tutto lo spazio. Una distribuzione dell'energia come questa è pratica quando si vogliono raggiungere molti ricevitori senza avere un collegamento diretto con ognuno di loro.

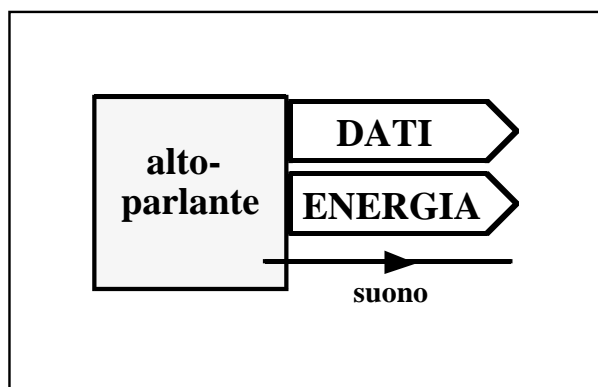


Fig. 20.1. Il suono proveniente dagli altoparlanti porta dati ed energia.

Se invece vogliamo raggiungere un solo ricevitore questo metodo è inadatto. Nella trasmissione con onde dirette le onde elettromagnetiche vengono raccolte in un fascio, cosicché la maggior parte dell'energia emessa dalla sorgente raggiunge l'antenna ricevente.

Nel ricevitore di dati c'è sempre qualcosa che viene "azionato" o "attivato":

- in un'antenna ricevente si devono indurre delle correnti elettriche;
- il timpano di una persona deve essere mosso;
- la membrana di un altoparlante deve essere mossa.

Questi processi si svolgono a condizione che con i dati arrivi anche sufficiente energia. Se le perdite di energia in una linea telefonica sono troppe, o se la radoricevente è troppo lontana dall'emittente, il trasporto di dati non funziona.

Per fare in modo che, malgrado la distanza tra sorgente e ricevitore, assieme ai dati arrivi sempre sufficiente energia si usa un *amplificatore*. Un amplificatore ha un'entrata e un'uscita per i dati. I dati entrano nell'amplificatore con poca energia e lo lasciano con molta energia. In fig. 20.3 trovi la rappresentazione simbolica di un amplificatore elettrico: in questo caso il portatore di dati in entrata e in uscita è l'elettricità.

Naturalmente l'amplificatore non può produrre da nulla l'energia supplementare. Ha bisogno di una seconda entrata per l'energia. Nella maggior parte dei casi giunge all'amplificatore grazie a un cavo di alimentazione.

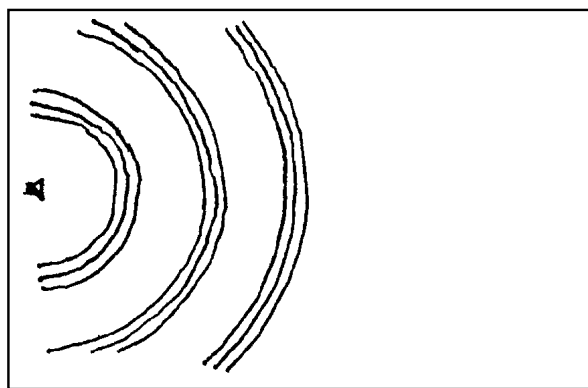


Fig. 20.2. L'energia che proviene dalla sorgente si distribuisce su una superficie sempre più grande.

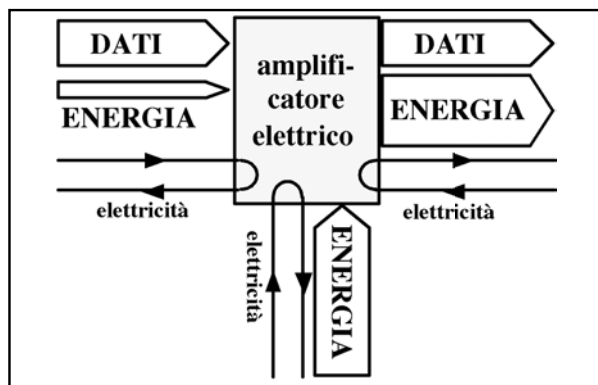


Fig. 20.3. Rappresentazione in simboli di un amplificatore elettrico.

In un amplificatore la corrente di energia che accompagna la corrente di dati viene aumentata.

Sull'esempio dell'amplificatore elettrico vogliamo capire meglio il funzionamento esatto di un amplificatore. Per semplicità immaginiamo che i dati siano codificati in binario. Nell'amplificatore entra un "segnale debole" che potrebbe assomigliare a quello in fig. 20.4a. L'intensità della corrente di energia è rappresentata in funzione del tempo. L'amplificatore lo trasforma in un "segnale forte". È importante che alla corrente di energia del segnale debole non venga semplicemente *sommata* una corrente di energia di intensità costante, come in fig. 20.4b. Il risultato sarebbe ancora un segnale debole, in quanto la differenza tra i valori più alti e quelli più bassi è ancora difficile da riconoscere, come in fig. 20.4a. Piuttosto l'amplificatore deve *moltiplicare* l'intensità della corrente di energia per il fattore più grande possibile. La fig. 20.4c mostra il risultato di una moltiplicazione per un fattore 8.

Quindi un amplificatore è caratterizzato dal fattore di aumento dell'intensità della corrente di energia in uscita rispetto all'entrata.

La fig. 20.5 mostra il flusso di dati da un lettore CD alle casse acustiche. Il lettore fornisce una corrente di energia di circa $0,1 \mu\text{W}$. Le casse hanno bisogno di 10 W . Perciò tra il lettore e le casse c'è un amplificatore. Il *fattore di amplificazione* di un comune impianto stereo è 10^8 .

L'intensità della corrente di energia dei segnali captati da un'antenna radio è ancora più bassa, circa

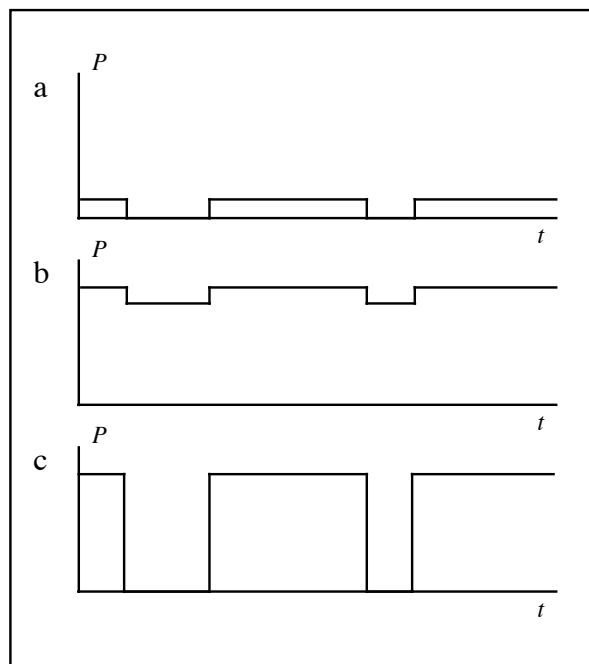


Fig. 20.4. Intensità P della corrente di energia in funzione del tempo t . (a) Segnale debole. (b) Dopo l'aggiunta di una corrente di energia di intensità costante il segnale rimane debole. (c) Segnale forte.

1 pW (un milionesimo di un milionesimo di watt). Quindi il fattore di amplificazione in un apparecchio radio deve essere circa 10^{13} .

In fig. 20.6 trovi il simbolo per il megafono. I dati entrano nel megafono con il portatore suono ed escono con lo stesso portatore, ma all'uscita il suono ha molta più energia che all'entrata.

Il relais è un amplificatore semplice per segni binari, fig. 20.7. Il simbolo corrispondente è in fig. 20.8.

Un amplificatore del genere si può facilmente trasformare in un amplificatore per segnali ottici binari, figg. 20.9 e 20.10.

Il programma televisivo giunge al telespettatore seguendo un percorso più complicato. Un'emittente televisiva ha una portata di soli 50 km circa. Per coprire distanze superiori ci vogliono delle stazioni intermedie con degli amplificatori, i cosiddetti *ripetitori per telecomunicazioni*, visibili su alcune montagne. I dati sono trasmessi dall'una all'altra in fasci di onde elettromagnetiche. Su ogni ripetitore

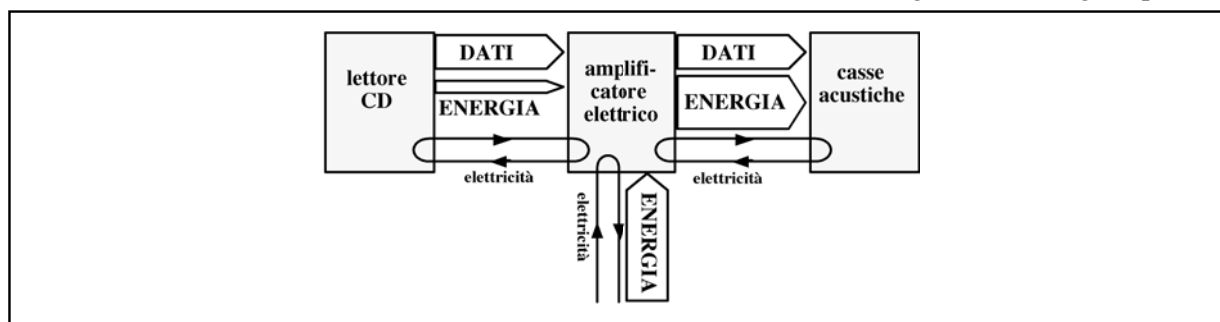


Fig. 20.5. Trasmissione di dati da un lettore CD alle casse acustiche.

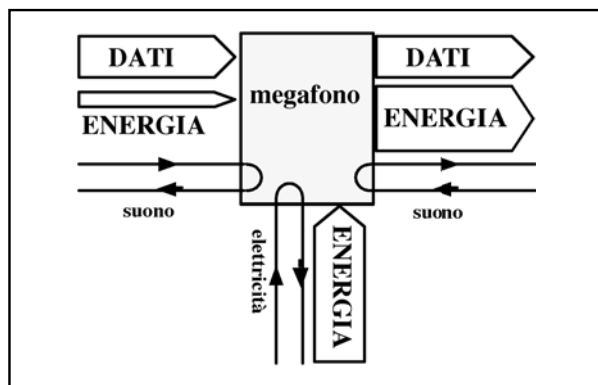


Fig. 20.6. Rappresentazione in simboli di un megafono.

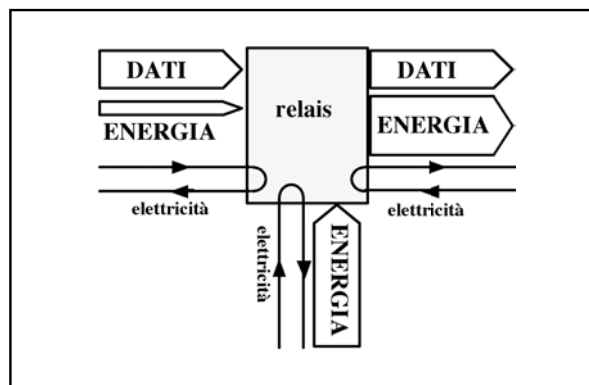


Fig. 20.8. Rappresentazione in simboli di un relais.

c'è un'antenna ricevente e un'antenna emittente. Tra la ricezione e la nuova emissione il segnale viene rinforzato, fig. 20.11. Le stesse stazioni servono a trasmettere su grandi distanze le comunicazioni telefoniche.

Tra i ripetitori la visuale deve essere libera. Quando per lunghe distanze non è possibile costruire nuovi ripetitori, per esempio attraverso gli oceani, la stazione viene messa su un satellite.

I ripetitori per telecomunicazioni hanno anche antenne di emissione per onde non dirette: così il programma televisivo è trasmesso ai singoli televisori.

C'è un metodo alternativo all'antenna ricevente per distribuire i dati ai vari ricevitori: la distribuzione via cavo. La televisione via cavo ha un segnale meno disturbato e offre una scelta tra molti più programmi. Le correnti di dati che si ottengono senza cavo sono di gran lunga meno intense. Le onde elettromagnetiche captate dall'antenna di un televisore bastano per pochi canali.

Da cosa dipende la quantità di energia necessaria al ricevitore di dati? Abbiamo già detto che nel ricevitore qualcosa deve essere attivato. Ma non si potrebbe attivare anche con pochissima energia? In linea di massima sì, ma qui entra in gioco un'altra complicazione.

Accanto alla vera sorgente di dati ci sono sempre anche altre "sorgenti di dati": dappertutto, in ogni

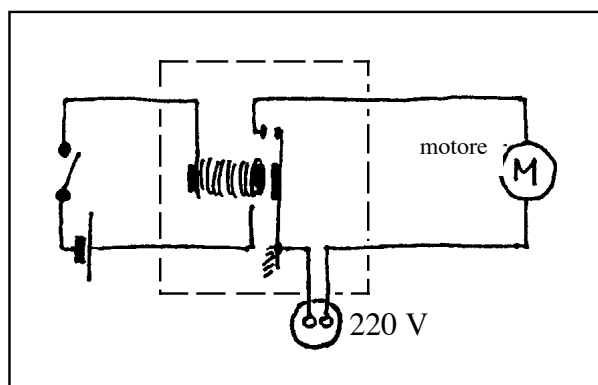


Fig. 20.7. Il relais è un amplificatore per segnali binari.

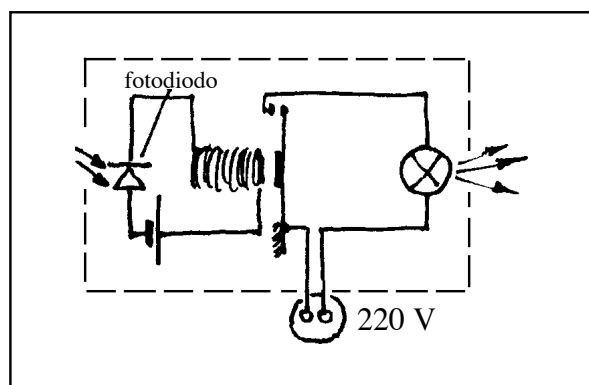


Fig. 20.9. Amplificatore per segnali ottici binari.

conduttore, in ogni trasfereatore appaiono dei disturbi incontrollabili. E anche i disturbi sono dati – però dati che non interessano il ricevitore, che per lui non hanno senso. Se sintonizziamo la radio su un'emittente debole, cioè lontana, oltre al vero e proprio programma sentiamo anche tutta una serie di disturbi. Per una buona ricezione dei dati, il segnale desiderato deve essere molto più forte del rumore e più forte significa: si deve dare più energia.

Nelle figg. 20.12a e 20.12b i disturbi sono rappresentati dalle frecce provenienti dal basso. (Per semplificare è stata tralasciata la freccia che rappresenta il portatore di dati e di energia.) La fig. 20.12a mostra una cattiva trasmissione: i dati utili hanno meno

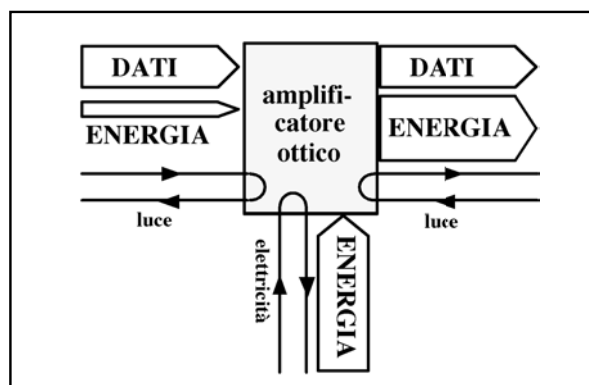


Fig. 20.10. Rappresentazione in simboli dell'amplificatore in fig. 20.9.

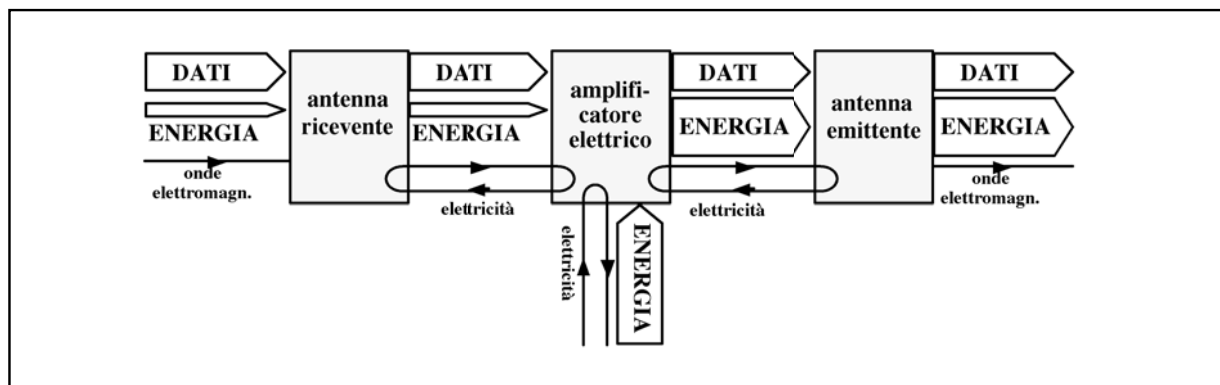


Fig. 20.11. Rappresentazione in simboli delle apparecchiature elettriche di una torre per telecomunicazioni.

energia del disturbo. La trasmissione di dati in fig. 20.12b è buona. Il disturbo ha molta meno energia dei dati da trasmettere. Il ricevitore può distinguere facilmente i dati utili dal disturbo.

Il gioco del "telefono senza fili" ci fa capire cosa succede quando il ricevitore non distingue più i dati utili dal disturbo: diverse persone si mettono in riga. La prima persona sussurra una frase alla seconda, la seconda sussurra la stessa frase, o quello che ha capito, alla terza e così via. Spesso ciò che arriva all'ultima persona non ha più molto a che vedere con la frase iniziale. Se tutti avessero parlato a voce alta, cioè trasmesso i loro dati con più energia, probabilmente la frase sarebbe giunta intatta fino alla fine della fila.

Esercizi

1. Cita quattro esempi di trasmissione di dati nei quali si usa un amplificatore.
2. Anche una persona può fungere da amplificatore. Fai un esempio.

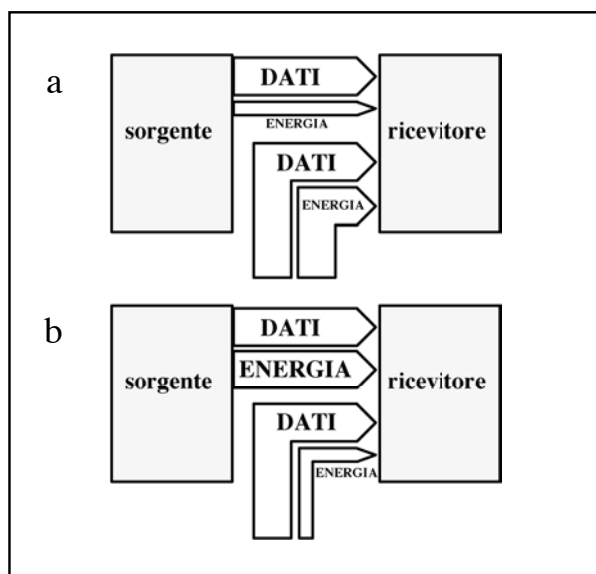


Fig. 20.12. Rappresentazione in simboli di una trasmissione perturbata. (a) Cattiva trasmissione. (b) Buona trasmissione.

20.2 L'elaborazione di dati

Ci siamo occupati del trasporto e dell'immagazzinamento di dati. Ora ci dedichiamo all'elaborazione dei dati. L'elaborazione dei dati avviene sia in sistemi naturali che tecnici. Il cervello degli esseri umani e degli animali è un sistema naturale dove si elaborano dati, il computer è un sistema tecnico. I sistemi che elaborano dati hanno una struttura gerarchica. Si può descrivere il loro funzionamento ai vari livelli della gerarchia. Cominciamo dalla descrizione della macrostruttura, per così dire guardando il sistema da lontano.

La struttura generale dei sistemi di elaborazione di dati

Quando si lavora al computer si hanno di fronte le seguenti componenti: 1. il computer vero e proprio, 2. diversi apparecchi per l'input/output di dati e 3. una o più unità di memoria esterne, fig. 20.13.

Un dispositivo di input serve a preparare i dati per il computer, cioè a trasferirli dal portatore con il quale arrivano all'elettricità e a codificarli in modo che il computer possa farne qualcosa.

Il dispositivo di output codifica i dati forniti dal computer in modo che l'utente li possa usare. "L'utente" può anche essere una macchina controllata dal computer.

C'è tutta una serie di dispositivi di input e output, tabella 20.1.

Quasi tutti i computer hanno una tastiera come dispositivo di input. Dapprima i caratteri sono codificati secondo un codice a 7 bit, poi ulteriormente elaborati.

Il joystick e il mouse sono altri dispositivi di input ben noti.

Alla cassa di molti supermercati e grandi magazzini ci sono dei lettori di codice a barre. Su ogni oggetto in vendita c'è una serie di linee che codificano una sequenza di cifre. Il lettore legge la larghezza e la distanza tra le linee e le traduce in un numero. Questo numero permette al computer di identificare la mer-

Tabella 20.1. Dispositivi di input e output per computer

<u>Dispositivi di input</u>
tastiera
joystick
mouse
scanner
videocamera
microfono
diversi sensori
<u>Dispositivi di output</u>
schermo
stampante
altoparlanti
diversi effettori

ce e comunicarne il prezzo alla cassa. Inoltre il magazzino sa quale e quanta merce è stata venduta.

Se con il computer vogliamo elaborare immagini o suoni, i dispositivi di input da usare sono uno scanner, una videocamera o un microfono.

I dispositivi di output più conosciuti sono lo schermo, la stampante e gli altoparlanti.

Molti computer servono a controllare dei processi industriali, per esempio in una fabbrica chimica o in una centrale elettrica. I dispositivi di input per computer del genere sono detti *sensori*. Un sensore è un apparecchio che misura una qualsiasi grandezza fisica, per esempio la temperatura, la pressione o la concentrazione di una certa sostanza, e trasmette con il portatore elettricità i dati misurati. Da questi dati il computer calcola se e come influenzare il processo produttivo. I dati ottenuti come risultato dei calcoli vengono trasmessi a dei dispositivi di output detti *effettori*. Esempi di effettori sono valvole azionate elettricamente o interruttori che, accendendo e spegnendo pompe, ventilatori, riscaldatori e simili, influenzano il processo.

La terza componente (fig. 20.13) è la *memoria esterna*. Nel computer ci sono già delle unità di memoria, ma per molte applicazioni la loro capacità è insufficiente. Per ovviare al problema si aggiungono delle unità supplementari di memoria esterna.

La struttura dei sistemi naturali di elaborazione di dati è molto simile. Il computer in fig. 20.13 corrisponde al cervello, i dispositivi di input corrispondono agli organi di senso e la voce o la mano che scrive hanno la funzione di dispositivo di output. Anche l'uomo usa volentieri la "memoria esterna" se ritiene di non potersi fidare della sua memoria (la "memoria di lavoro"): blocco per appunti, agenda, biblioteca, ecc.

I livelli di base nei sistemi di elaborazione di dati

Continuiamo la descrizione dei sistemi di elaborazione di dati a un livello molto inferiore. Le strutture di cui ci occupiamo ora sono così piccole che per vederle ci vuole il microscopio.

Nel computer si trovano a livello dei componenti elettronici. Il più importante tra questi è il transistor. Più avanti ci occuperemo del funzionamento del transistor. Per ora diciamo solo che il transistor è un interruttore azionato elettricamente. Quindi fa la stessa cosa di un relais, ma molto molto più in fretta. La fig. 20.14 mostra il simbolo del transistor. I collegamenti 1 e 2 sono l'entrata rispettivamente l'uscita per la corrente elettrica. Grazie al collegamento 3 la corrente può essere accesa o spenta: a seconda del potenziale del collegamento 3, l'elettricità scorre o non scorre tra 1 e 2.

Tutta l'elaborazione dei dati in un computer si può ricondurre all'apertura e chiusura di "interruttori" del genere. Visto che un interruttore può solo essere aperto o chiuso, cioè ha *due* possibili stati, l'elaborazione dei dati in un computer deve avvenire in codice binario.

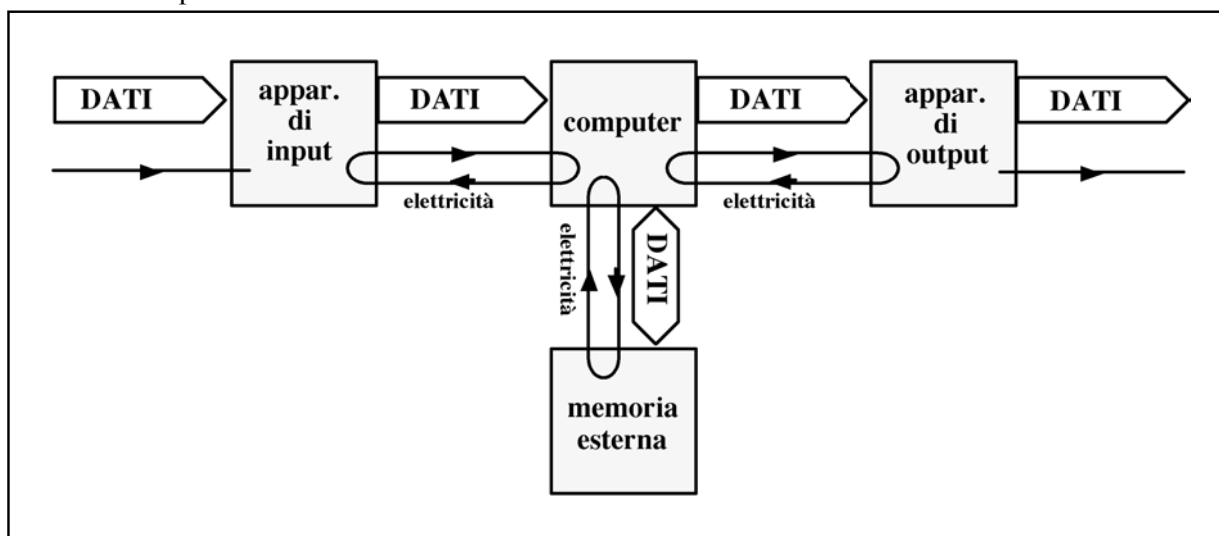


Fig. 20.13. Rappresentazione in simboli di un computer.

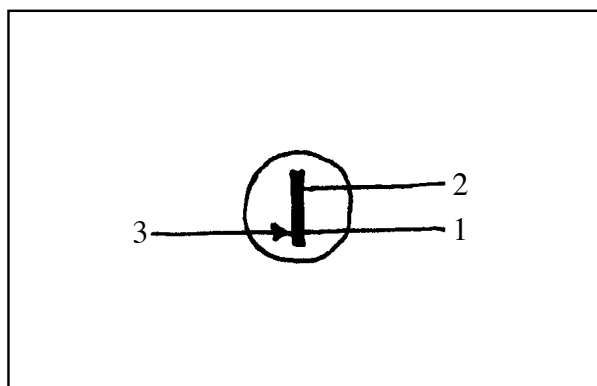


Fig. 20.14. Simbolo per il transistor.

Nella nostra descrizione di un computer risaliamo di un livello, al livello dei *chips*. Un chip è un componente che contiene un gran numero di transistor. Ogni chip è montato in un piccolo telaio di plastica nero. Il telaio ha due file di collegamenti che sporgono dai lati come le zampe di un millepiedi, fig. 20.15. Questi elementi si riconoscono facilmente guardando dentro un computer. Il chip vero e proprio è una lastra, al massimo di pochi cm^2 , con uno strato contenente centinaia di migliaia di transistor. Oltre ai transistor, in alcuni chip si sono anche diodi e resistori. Ma i transistor sono i componenti principali. I transistor (e i resistori e i diodi) sono collegati tra loro a formare una complessa "rete" che permette al chip di effettuare certe operazioni. Ci sono chip con le seguenti funzioni: immagazzinare, calcolare, codificare, segnare il tempo...

Più avanti spiegheremo in che modo il collegamento tra i transistor permette di compiere operazioni logiche.

La descrizione che abbiamo dato dei computer corrisponde alle macchine costruite al giorno d'oggi. Naturalmente potrebbero essere fatti diversamente.

Le vecchie macchine calcolatrici, una sorta di computer primitivi, lavoravano in modo puramente meccanico. Nei primi computer "moderni" come interruttori si usavano dei relais. Rispetto a queste macchine elettromeccaniche gli odierni computer,

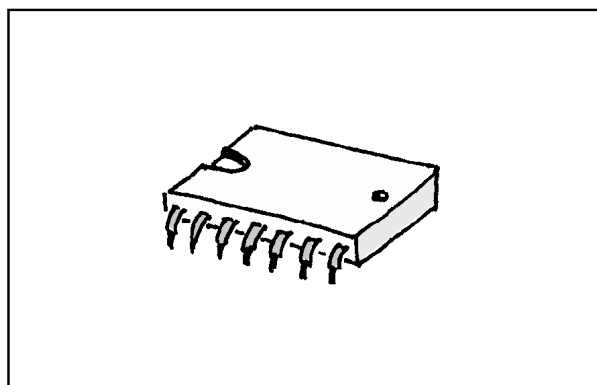


Fig. 20.15. Aspetto di un chip.

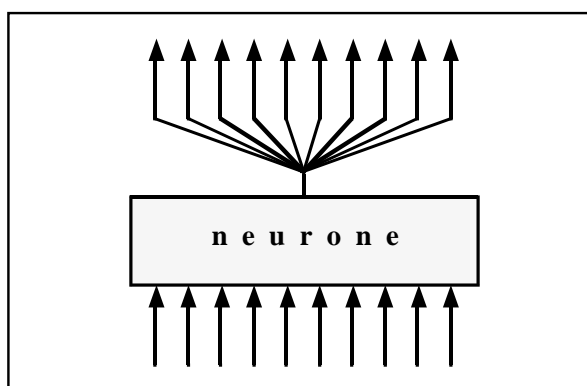


Fig. 20.16. Rappresentazione in simboli di un neurone.

interamente elettronici, hanno degli enormi vantaggi: un transistor è molto più piccolo e meno costoso di un relais, è più affidabile e lavora molto più in fretta. Il fatto che il computer elettronico abbia così tanti vantaggi non significa che non se ne possano costruire di diversi ancora più efficienti. In questo senso si lavora allo sviluppo dei computer ottici, che dovrebbero essere più veloci degli attuali computer elettronici. Il portatore di dati non è l'elettricità ma la luce.

Anche il cervello è fatto di tanti piccoli componenti, ognuno dei quali può trovarsi in uno di due stati possibili. Sono le cellule nervose o *neuroni*. Nel cervello ci sono circa 10^{10} neuroni. È più di 100 volte il numero di transistor di un supercomputer. Ma un neurone è un componente decisamente più complesso di un transistor. Un neurone ha grosso modo 10000 entrate, ma solo un'uscita, fig. 20.16. Il conduttore in uscita si ramifica rapidamente ed è collegato alle entrate di altre cellule nervose. Una struttura del genere si chiama *rete neurale*.

Ogni entrata di ogni cellula nervosa può trovarsi a un potenziale elettrico alto o basso. Il livello del potenziale all'uscita della cellula nervosa dipende dal numero di entrate che hanno un potenziale alto.

Programmi per computer

È facile immaginare una macchina elaboratrice di dati che sappia svolgere un solo compito. Una macchina del genere sarebbe poco pratica. Per ogni nuovo compito dovremmo acquistare o costruire una nuova macchina. Con un computer invece si possono svolgere molti compiti diversi. Già una calcolatrice tascabile dà la possibilità di eseguire funzioni diverse premendo i tasti giusti: sommare, sottrarre, moltiplicare, dividere, estrarre la radice quadrata, ecc. In un vero computer si può fare molto di più: grazie alla tastiera si possono dare *ordini* al computer. Un ordine potrebbe per esempio fargli eseguire un calcolo, leggere un numero dalla memoria, scrivere una lettera sullo schermo... Il numero di ordini che il computer "capisce", cioè che sa eseguire, è molto grande.

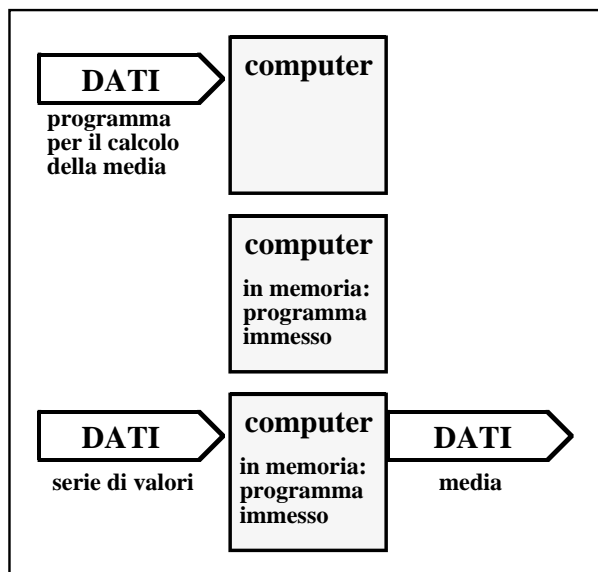


Fig. 20.17. Grazie all'immissione di un programma, il computer viene trasformato in una macchina in grado di calcolare la media.

La riduzione dati

Un centro di elaborazione dati riceve dati e cede dati. Lo stesso vale per un trasferitore di dati e un codificatore. Questo significa che un computer non è nulla più di un codificatore? Che i dati in entrata contengono le stesse informazioni dei dati in uscita, solo cifrati diversamente? Se fosse così la quantità di dati ricevuta dovrebbe coincidere con quella ceduta. Controlliamo se è vero. A questo scopo consideriamo un semplice esempio.

Un computer è programmato per calcolare la media aritmetica. Per semplicità diciamo che i numeri immessi sono interi e che la media viene calcolata senza cifre decimali.

Facciamo calcolare al computer la nota media di una prova scritta. Ammettiamo che la classe abbia 30 studenti e che il punteggio massimo nella prova scritta sia di 15 punti. Quindi nel computer vengono immessi 30 numeri, ognuno dei quali può essere uno dei 16 numeri interi compresi tra 0 e 15. Considerando che $16 = 2^4$ con ogni numero il computer riceve 4 bit, in totale

$$30 \cdot 4 \text{ bit} = 120 \text{ bit}.$$

Lanciamo il programma e il computer calcola la media: un unico numero compreso tra 0 e 15. La quantità di dati all'uscita è quindi di soli 4 bit, fig. 20.18. Il computer ha diminuito, o "ridotto" la quantità di dati.

Il computer riduce la quantità di dati.

Sorprendente. Vuol forse dire che chi riceve i dati in uscita ne sa meno di chi li riceve in entrata? Sì, vuol proprio dire quello. Chi sa solo la media non può ricostruire i risultati dei singoli studenti. Ma non è peggio così? Perché usiamo il computer allora? Lo

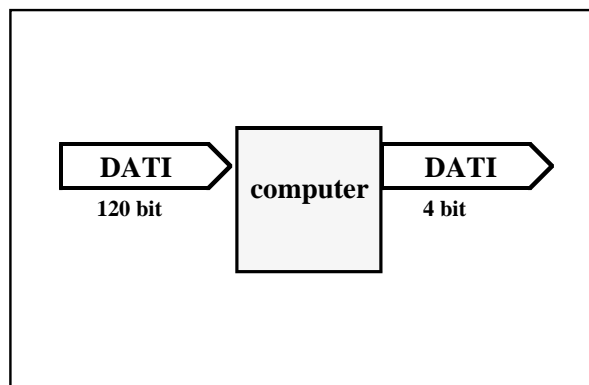


Fig. 20.18. La quantità di dati che entra in un computer è superiore alla quantità di dati che ne esce.

usiamo proprio perché con tutti i dati in entrata non ci raccapezziamo più. Se per esempio dovessimo confrontare una classe con una classe parallela, la quantità di dati all'entrata del calcolatore sarebbe troppo grande. Di fronte a molti dati una persona perde la visione d'insieme, non ne viene più a capo. Quindi usa il computer non perché ha troppo pochi dati, ma perché ne ha troppi.

Ci rendiamo conto della riduzione della quantità di dati dal fatto che dai dati in uscita non è più possibile ricostruire i dati in entrata, nemmeno se si conosce bene il programma usato dal computer. Si possono ottenere gli stessi dati in uscita con dati differenti in entrata. La tabella 20.2 mostra alcuni esempi. Nella colonna di sinistra è descritta la funzione del computer. Nella colonna centrale ci sono alcuni esempi di dati immessi e nella colonna di destra ci sono i dati che appaiono in uscita.

Gli ultimi due esempi dimostrano che già approssimando si perdono dati.

In alcuni casi la quantità di dati in uscita è uguale a quella in entrata, cioè si possono ricostruire i dati in entrata a partire dai dati in uscita. Un esempio molto semplice è l'inversione del segno. Ma anche un codificatore ha questa caratteristica. Se il computer viene usato solo per immagazzinare dati, naturalmente non c'è nessuna riduzione.

Stiliamo il bilancio per i dati in un caso più complesso. Questa volta il computer viene usato per il rico-

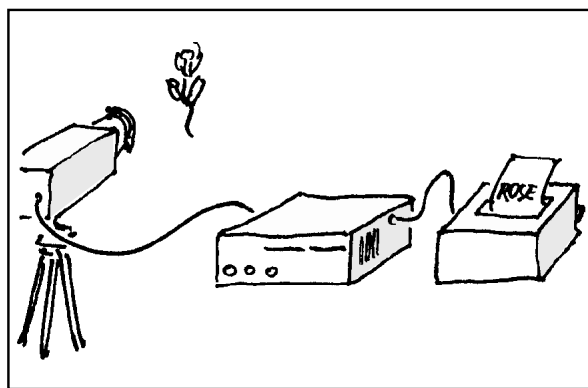


Fig. 20.19. Un impianto di riconoscimento di immagini è composto da una videocamera, un computer e una stampante.

Tabella 20.2. La quantità di dati in uscita da un computer è inferiore alla quantità di dati in entrata.

Cosa fa il computer programmato	Dati immessi (input)	Dati ottenuti (output)
sommare numeri interi positivi e negativi	10, 5	15
	5, 10	15
	14, 1	15
	-123, 138	15
eseguire l'operazione logica E	0, 0	0
	1, 0	0
	0, 1	0
ordinare alfabeticamente	Bob, Willy, Lilly	Bob, Lilly, Willy
	Bob, Lilly, Willy	Bob, Lilly, Willy
	Willy, Bob, Lilly	Bob, Lilly, Willy
approssimare alla terza cifra decimale	2,7184	2,178
	2,7182818	2,178
	2,7176	2,178
calcolare la radice quadrata fino alla terza cifra decimale	2	1,414
	1,998	1,414
	2,0007	1,414

noscimento di immagini, fig. 20.19. Dispositivo di input: una videocamera digitale; dispositivo di output: una stampante. Nel caso ideale il riconoscimento di immagine funziona così: puntiamo la videocamera digitale sull'oggetto da riconoscere, per esempio una rosa, e poco dopo la stampante stampa la parola "rosa".

Immaginiamo che su un foglio di carta ci sia un sette. Il sette può avere vari aspetti, fig. 20.20. Indipendentemente da come è scritto sul foglio la stampante stampa sempre la stessa cosa: un normale sette nel carattere standard. Quindi in entrata può esserci una di molte possibili immagini del sette, ma in uscita c'è sempre la stessa immagine.

Di quanto viene ridotta la quantità di dati in questo caso? In precedenza avevamo calcolato che un'immagine contiene 50 Mbit. Perciò dalla videocamera digitale il computer riceve 50 Mbit.

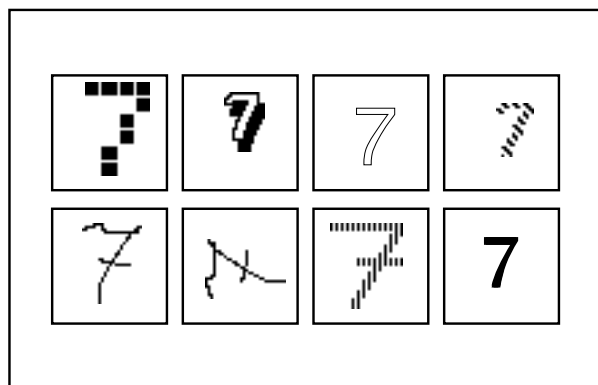


Fig. 20.20. Il computer deve riconoscere tutti questi segni come "sette".

Dal computer la stampante riceve l'ordine di stampare un carattere. Come visto in precedenza un carattere porta 7 bit.

Quindi in questo caso il computer riduce la quantità di dati da 50 Mbit a 7 bit.

Il lavoro svolto da questa apparecchiatura per il riconoscimento di immagine è svolto dal nostro cervello secondo dopo secondo: la percezione ottica e acustica dell'ambiente circostante si basa sulla riduzione di dati. Possiamo chiarirlo nel seguente modo.

Bendiamo una persona e la portiamo in un ambiente a lei sconosciuto, le togliamo la benda esattamente per un secondo, poi la riportiamo nell'ambiente iniziale. Le chiediamo che oggetti ha visto. Probabilmente non sarà in grado di dirne più di dieci. A quanti bit corrispondono questi 10 oggetti?

Per ottenere la quantità di dati portata dal nome di un oggetto dobbiamo sapere quanti oggetti con nomi diversi ci sono in totale. Visto che ogni oggetto ha un nome, lo si trova nel dizionario. Un dizionario tipico contiene 60 000 parole. Stimiamo generosamente che ci siano anche 60 000 oggetti di nome diverso. Questo significa che per ogni oggetto citato riceviamo una quantità di dati di 16 bit. Citando 10 oggetti riceviamo

$$10 \cdot 16 \text{ bit} = 160 \text{ bit.}$$

Ma quanti bit ha ricevuto la persona nel secondo senza benda? In precedenza avevamo stimato in 1000 Mbit la quantità di dati ceduta in un secondo dallo schermo di un televisore. Visto che nel nostro caso si tratta di percezione visiva come nel caso del televisore, anche la persona ha ricevuto 1000 Mbit nel secondo in cui le è stato permesso guardare.

Quindi la quantità di dati è stata ridotta da 1000 Mbit a 160 bit. Ci rendiamo conto di come anche nel cervello umano ci siano massicce riduzioni di dati e che queste riduzioni siano una componente fondamentale di ciò che chiamiamo percezione.

La percezione si basa sulla riduzione di dati.

Il computer è superiore all'uomo?

La domanda è posta male. Naturalmente il computer è superiore all'uomo in certe cose – ma in altre no. Questo vale già per una calcolatrice tascabile. Ma vale anche per un motore d'auto o per un elefante: sono entrambi più forti di un uomo. Una domanda migliore sarebbe: in cosa il computer è superiore all'uomo? Il computer è superiore all'uomo nello svolgere semplici operazioni di calcolo, nettamente superiore. Un comune calcolatore può effettuare milioni di calcoli al secondo. Ma ci sono anche dei tipici problemi di "elaborazione di dati" che un uomo risolve molto meglio e molto più in fretta del più potente supercomputer esistente. Il riconoscimento di immagine è uno dei problemi di questo tipo. Anche un computer ben programmato fa ancora fatica a distinguere tra la foto di un cane e quella di un gatto o di un cavallo. Il motivo per cui gli esseri umani e addirittura anche gli animali svolgono meglio compiti del genere va cercato nella struttura a rete del cervello. Si sta tentando di sviluppare dei computer costruiti come le reti neurali.

Esercizi

1. Un computer è programmato nel modo seguente: quando si immette un numero x , calcola x^2 e lo scrive sullo schermo. Spiega perché compie una riduzione di dati.
2. La quantità di dati viene ridotta quando si calcola x^3 ? (x è un numero intero)

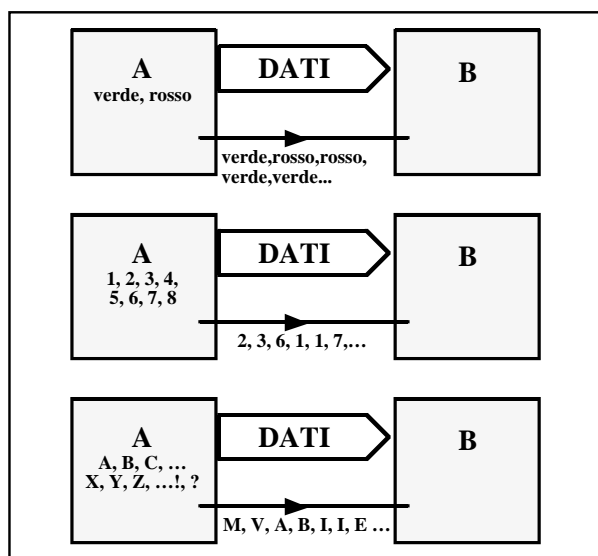


Fig. 20.21. Tre trasmissioni di dati con tre diversi tipi di segno.

20.3 Generalizzazione della definizione di quantità di dati

La fig. 20.21 mostra tre esempi di trasmissione di dati tra una persona A (la sorgente) e una persona B (il ricevitore). I tre esempi si distinguono per il numero di segni a disposizione. Nel caso (a) ci sono a disposizione 2 segni, luce rossa e luce verde. Nel caso (b) sono 8 segni, le cifre da 1 a 8. Nel caso (c) sono 32 segni, 26 lettere e 6 segni di punteggiatura. Ora ci chiediamo quanto è difficile per il ricevitore B indovinare il prossimo segno prima che arrivi.

Nel primo caso B ha una possibilità su 2 di indovinare, quindi 1:2. Diciamo che la *probabilità* che B indovini è 0,5. Nel secondo caso è già più improbabile che B indovini, la probabilità è 1:8 = 0,125 e nel terzo caso la probabilità è solo 1:32 = 0,031.

Ora, sappiamo che nel primo caso con ogni segno viene trasmesso 1 bit, nel secondo caso 3 bit e nel terzo 5 bit. Quindi abbiamo la regola:

Quando è più facile per il ricevitore prevedere un segno, il segno porta meno bit.

Usiamo questo risultato per analizzare il seguente gioco.

Willy pensa a un numero tra 1 e 64. Bob deve indovinare il numero ponendo a Willy il minor numero possibile di domande sì/no.

Ipotizziamo che Willy abbia pensato al 28. Bob può applicare diverse strategie. Confrontiamo due possibili strategie.

Prima strategia

B: È l'1?
W: No.
B: È il 2?
W: No.
B: È il 3?
W: No.
.....
B: È il 28?
W: Sì.

Ci sono volute 28 domande affinché Bob trovasse il numero.

Seconda strategia

B: È un numero maggiore di 32?
W: No.
B: È un numero maggiore di 16?
W: Sì.
B: È un numero maggiore di 24?
W: Sì.
B: È un numero maggiore di 28?
W: No.
B: È un numero maggiore di 26?
W: Sì.
B: È un numero maggiore di 27?
W: Sì.

Bob trova il numero dopo 6 domande.

Questo esempio ci pone di fronte a un problema. In precedenza avevamo definito il bit come la quantità di dati trasmessa con la risposta a una domanda sì/no. Ma allora Bob quanti bit ha ricevuto? 28 o 6? La quantità di dati trasmessa non può dipendere dall'intelligenza o dall'ingenuità dimostrata da coloro che comunicano. Non conta la strategia – alla fine Bob conosce il numero, i dati gli sono arrivati.

C'è un modo sicuro per sapere quanti bit riceve Bob: Willy avrebbe anche potuto semplicemente dire a Bob il numero. In questo caso è facile calcolare il numero di bit: il numero è una scelta tra 64 segni diversi. Visto che $64 = 2^6$ il numero porta 6 bit. Ma ciò significa che applicando la strategia peggiore ogni domanda sì/no porta meno di 1 bit.

Il fatto che Bob riceve meno di 1 bit a domanda quando usa la strategia peggiore, è in accordo con la regola trovata all'inizio di questo capitolo: "quando è più facile per il ricevitore prevedere un segno, il segno porta meno bit". Effettivamente Bob ha una grande probabilità di sapere la risposta alla sua domanda. Infatti sa che molto probabilmente la risposta alla domanda "è l'1?" sarà "no". La probabilità che si sbagli è solo 1 : 64, la probabilità che abbia ragione 63 : 64. Con la strategia migliore l'incertezza sulla prossima risposta è maggiore. Che venga scelto il "sì" o il "no", la probabilità di aver ragione è solo 1 : 2.

Dal confronto delle due situazioni concludiamo che la risposta a una domanda sì/no porta 1 bit solo nel caso in cui le due risposte abbiano la stessa probabilità di essere vere.

Con un segno binario viene trasmesso 1 bit se i due segni a disposizione sono equiprobabili. In tutti gli altri casi viene trasmesso meno di 1 bit.

Lo stesso vale se i segni a disposizione sono di più, quindi se non usiamo dei segni binari. Se i segni possibili sono 4, uno di questi segni porta 2 bit solo se tutti e 4 i segni sono equiprobabili. Se i segni a disposizione sono 8, ogni segno porta 3 bit solo se tutti e 8 sono equiprobabili.

Avevamo calcolato che con un carattere si trasmettono poco meno di 7 bit. Avevamo anche dato per scontato che tutti i caratteri fossero equivalenti. In verità non è così, in una normale pagina di testo i caratteri non sono equiprobabili. Così la "e", la "t" o lo spazio appaiono più spesso della "q", della "z" e del punto interrogativo. Dobbiamo concludere di aver sopravvalutato il contenuto in bit di ogni carattere.

Ogni volta che si trasmettono informazioni con dei caratteri non equiprobabili, si dice che il codice corrispondente è *ridondante*.

Per esempio possiamo definire il seguente codice, fortemente ridondante. Un'informazione viene trasmessa raddoppiando ogni lettera. La parola "Cane" apparirà così: "CCaannee". Dopo aver ricevuto la prima C, gli altri segni diventano alquanto improba-

bili; non sarà una a, né una A, né una b, né una B, ecc. Il ricevitore sa esattamente che arriverà un'altra C. Così come sa che dopo la prima a ne arriverà una seconda.

La ridondanza rende la trasmissione più impegnativa, dura più a lungo. Malgrado ciò la si usa spesso perché ha il vantaggio di rendere la trasmissione meno soggetta a disturbi lungo il percorso. Anche se qualcosa andasse perso nella trasmissione della sequenza di segni "CCaannee" e, per esempio, arrivasse solo "C aa nee", il ricevitore può ancora riconoscere la parola.

Calcio e lotto

Willy e Lilly hanno pianificato un'altra trasmissione con segnali luminosi rossi e verdi. Lilly deve dire a Willy

- alle 10.00 se il Bayern ha vinto (vinto: "verde", perso o pareggiato: "rosso");

- alle 10.05 se Willy ha fatto un sei al lotto (vinto: "verde", non vinto: "rosso").

In quale delle trasmissioni la quantità di dati trasmessa è maggiore? Per rispondere alla domanda applichiamo la regola: "quando è più facile per il ricevitore prevedere un segno, il segno porta meno bit."

Nella prima trasmissione è difficile dire se arriverà un segnale "verde" o "rosso": il Bayern ha una buona probabilità di vincere, ma anche l'avversario è forte. Invece nel secondo caso Willy è quasi sicuro che finirà come è sempre finita: probabilmente non avrà fatto sei. Quindi nel primo caso la quantità di dati trasmessa è maggiore che nel secondo.

Con la nostra nuova e migliorata definizione di bit giungiamo alla stessa conclusione: ipotizziamo che la probabilità che il Bayern vinca sia 0,5. La probabilità di vedere il segno "verde" è uguale a quella di vedere il "rosso". Stando alla nostra nuova definizione di bit, viene trasmesso esattamente 1 bit. Nella seconda trasmissione invece le probabilità per "verde" e "rosso" sono molto diverse: il "rosso" è molto più probabile del "verde". Quindi viene trasmesso meno di 1 bit.

La migliore strategia di pesata

Tra 27 bilie somiglianti ce n'è una più pesante delle altre 26 di peso uguale. Con l'aiuto di una bilancia a piatti si deve scoprire con il minor numero di pesate possibile qual è la bilia più pesante. Sui piatti della bilancia si possono mettere solo le bilie e nessun altro oggetto, fig. 20.22.

A ogni pesata la bilancia risponde a una domanda che le poniamo. La bilancia può dare tre diverse risposte: 1. il piatto di destra scende, 2. il piatto di sinistra scende e 3. equilibrio.

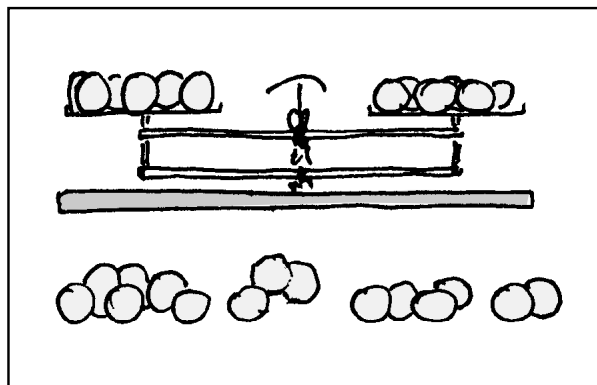


Fig. 20.22. Quante pesate ci vogliono per trovare la bilia più pesante?

Per rispondere nel minor numero di pesate dobbiamo porre le domande in modo da ottenere il massimo di bit per ogni pesata. Questo significa: le tre risposte devono essere il più possibile equiprobabili. Sicuramente non è una buona idea cominciare con una sola bilia su ogni piatto. La probabilità che la bilancia resti in equilibrio è molto più alta delle altre.

Quante pesate sono necessarie?

Qual è la strategia migliore?

Fortuna e sfortuna

Confrontiamo di nuovo le due strategie per indovinare un numero tra 1 e 64, come abbiamo fatto all'inizio del paragrafo. La strategia peggiore comincia con la domanda "è l'1?". Ci rendiamo conto che in questo caso possiamo essere fortunati o sfortunati. Se il numero pensato è veramente l'uno, l'abbiamo trovato con una sola domanda, abbiamo avuto fortuna. Se invece il numero pensato è il 64 ci vogliono 63 domande, abbiamo avuto sfortuna.

La strategia migliore esclude la fortuna e la sfortuna. Indipendentemente dal numero pensato ci vogliono sempre 6 domande.

Se qualcuno trova il numero al primo colpo con la strategia peggiore, si può certamente dire che è "più fortunato che bravo".

Musica e quantità di dati

Quando si suona e ascolta un brano musicale, vengono trasmessi dei dati. Il musicista con lo strumento è la sorgente, chi ascolta è il ricevitore.

Immaginiamo che lo strumento sia uno xilofono con 15 note. Vengono suonate solo delle semiminime, una pausa di una semiminima conta come nota. Se tutte le note sono suonate con la stessa probabilità, ogni nota porta 4 bit, altrimenti meno.

Quando ascoltiamo musica abbiamo determinate aspettative sulla prossima nota. In una melodia che

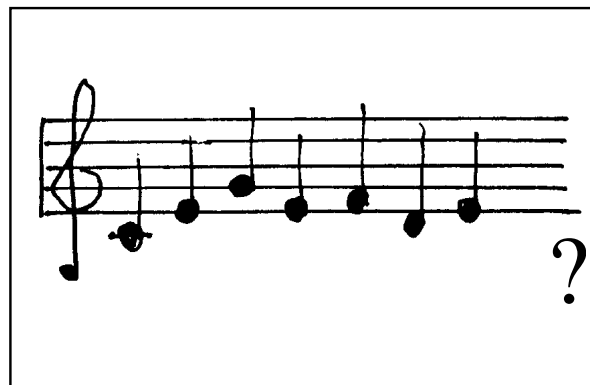


Fig. 20.23. Qual è la prossima nota?

inizia come quella in fig. 20.23 ci aspetteremmo come prossima nota un Do1. È poco probabile che ci sia per esempio un La1 o un Re1.

Possiamo constatare che un brano non ci sembrerà bello se:

- l'aspettativa è delusa troppo spesso;

- l'aspettativa è soddisfatta troppo spesso.

Se la melodia non continua come ci aspettiamo ci sembrerà caotica o "incomprensibile". È così quando ogni nota ha la stessa probabilità, cioè quando le note portano il massimo numero di bit.

Invece quando la melodia si sviluppa molto spesso così come ce l'aspettiamo ci sembrerà noiosa e monotona. In questo caso con ogni nota riceviamo pochi bit, la potevamo indovinare facilmente.

Abbiamo scoperto una regola della composizione: la quantità di dati non deve essere né troppo grande né troppo piccola.

Storicamente la musica si è sviluppata in direzione di un continuo aumento della quantità di dati. Questo spiega perché la musica moderna è sempre stata considerata più difficile da capire.

Esercizi

1. Willy lancia dei comuni dadi (cioè con le cifre da 1 a 6). Lilly deve indovinare la cifra ottenuta con il minor numero possibile di domande sì/no. Come può porre la prima domanda per ottenere 1 bit con la risposta? Dai due varianti. Spiega perché con la domanda "È il sei?" Lilly riceve meno di 1 bit.

2. Lo skat si gioca con un mazzo di 32 carte. Qual è il numero minimo di domande sì/no da porre per avere la certezza di indovinare una carta estratta a caso?

3. La persona A pensa una parola. La persona B deve indovinarla ponendo ad A il minor numero possibile di domande sì/no. Che strategia deve applicare? Più o meno quante domande saranno necessarie con questa strategia?

L u c e

21. La luce

21.1 Sorgenti luminose

Le *sorgenti luminose* sono oggetti che emettono luce. Tra loro troviamo:

- il Sole;
- il filo incandescente di una lampadina;
- il tubo fluorescente;
- la fiamma di una candela;
- il diodo luminoso (usato come indicatore luminoso in molti apparecchi elettrici);
- lo schermo di un televisore;
- il laser.

Riscaldando un corpo possiamo fargli emettere luce. Ogni corpo, ogni sostanza, comincia a emettere luce se la sua temperatura supera gli 800 °C. Alcune delle sorgenti luminose elencate sopra si basano su questo principio: il Sole, le stelle fisse e la lampadina. Ma anche la luce di una candela è emessa dalle piccole particelle incandescenti di carbonio che ci sono nella fiamma.

Si può produrre luce anche senza riscaldare: il tubo fluorescente, il diodo luminoso, lo schermo del televisore e il laser sono sorgenti luminose fredde.

Non tutti gli oggetti che emettono luce sono sorgenti luminose. Molti corpi emettono luce solo perché ne ricevono. Non fanno che rigettare la luce ricevuta, o una parte di essa. La maggior parte dei corpi che ci circondano fanno parte di questa categoria. In particolare alcuni corpi celesti ben visibili lo sono solo perché riflettono la luce che ricevono dal Sole: la Luna e i pianeti.

21.2 Alcune proprietà della luce.

La luce è una sostanza - ma una sostanza molto particolare. Discutiamo alcune delle sue proprietà.

La velocità della luce

Isoliamo un raggio dalla luce emessa da una lampadina. Oppure usiamo un laser, che emette già un raggio di luce sottile.

Nel punto dove il raggio colpisce la parete vediamo una macchia illuminata. Interrompiamo brevemente il raggio di luce frapponendo la mano. La macchia sulla parete scompare praticamente nello stesso istante in cui la mano interrompe il raggio e riappare non appena la mano lascia passare nuovamente la luce. Sembra che la luce vada dal punto dove si trova la mano fino alla parete in modo istantaneo. Invece un po' di tempo ci vuole, anche se molto molto poco. La luce si muove molto in fretta: alla velocità di

$$v = 300\,000 \text{ km/s.}$$

Come possiamo dirlo con tanta certezza? La velocità della luce non dipende da quanto viene accelerata dalla sorgente? Non ci sono sorgenti che emettono luce più lenta? Dopotutto possiamo generare un getto d'acqua più o meno rapido. No, non si può rendere la luce più veloce o più lenta di 300 000 km/s - perlomeno fintanto che la luce si muove nell'aria o nel vuoto.

Non è facile misurare velocità così elevate. Però è possibile, in diversi modi. Forse a scuola avete gli apparecchi necessari per compiere una misurazione del genere.

Ma c'è anche un sistema per rallentare la luce, per fare in modo che si muova più lentamente: la facciamo passare nel vetro o in un altro materiale trasparente, solido o liquido. Nel vetro la velocità della luce è circa 200 000 km/s. Nell'acqua la luce si muove a una velocità di circa 225 000 km/s. Non si può dire che la luce sia proprio frenata, in quanto non appena esce dal vetro o dall'acqua riprende la sua precedente velocità di 300 000 km/s, fig. 21.1. A ogni materiale corrisponde una velocità della luce.

Nell'aria e nel vuoto la luce si muove a una velocità di 300 000 km/s.

Il fatto che la velocità della luce sia così alta ha una conseguenza che tutti conoscete: si muove praticamente in linea retta. Il getto d'acqua in fig. 21.2 è curvato verso il suolo. Più il getto è forte - più l'acqua è veloce - più sarà diritto. Se l'acqua del getto si muovesse alla velocità della luce il getto d'acqua sarebbe diritto come un raggio di luce.

La luce si muove in linea retta.

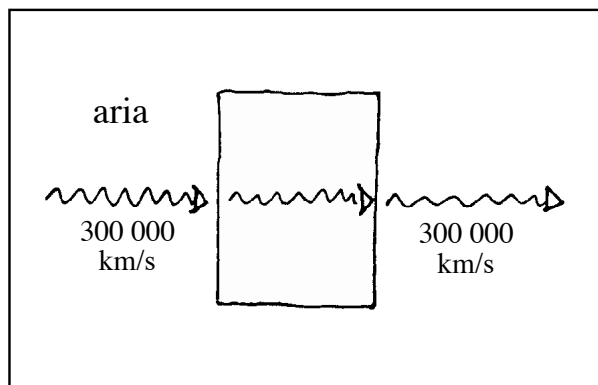


Fig. 21.1. Quando la luce esce dal vetro riprende la velocità che aveva prima.

La luce è invisibile

La luce si può vedere? A dire il vero la domanda contiene una contraddizione. È un po' come la domanda: "si può pagare il denaro?" La luce è il mezzo che ci permette di vedere. Quando vediamo un oggetto c'è luce che va dall'oggetto al nostro occhio. Allora diciamo: "vediamo l'oggetto" e non "vediamo la luce proveniente dall'oggetto". Malgrado ciò potrà sorprendere qualcuno sapere che effettivamente la luce non si può vedere. Per convincercene puntiamo un raggio laser attraverso l'aula, da sinistra verso destra. Vediamo il laser e vediamo una macchia di luce sulla parete, ma lungo il percorso della luce non vediamo niente - a meno che nell'aria ci sia della polvere. Nel qual caso vedremo anche il percorso della luce. Ma ciò che vedremo non sarebbe la luce, solo le particelle di polvere illuminate.

Tra l'altro è interessante rendersi conto che il cielo notturno è pieno di luce, esclusa una piccola parte nell'ombra della Terra. Ma noi quella luce non la vediamo, fig. 21.3.

Anche se la luce non si può vedere si parla spesso di luce "visibile" per distinguerla da quei tipi di luce ai quali il nostro occhio non è sensibile, come la luce ultravioletta e infrarossa. La luce ultravioletta e infrarossa sono dette luce "non visibile".

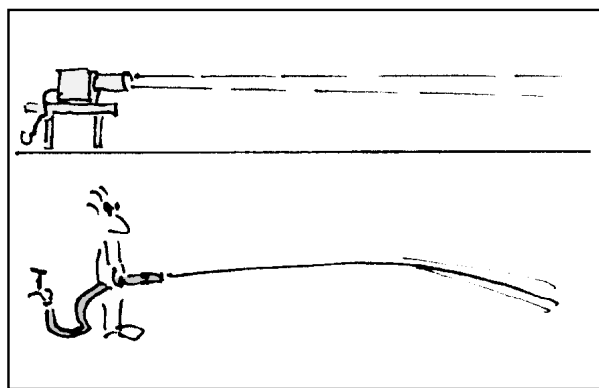


Fig. 21.2. L'acqua del getto cade verso terra, la luce del raggio invece non lo fa (o quasi).

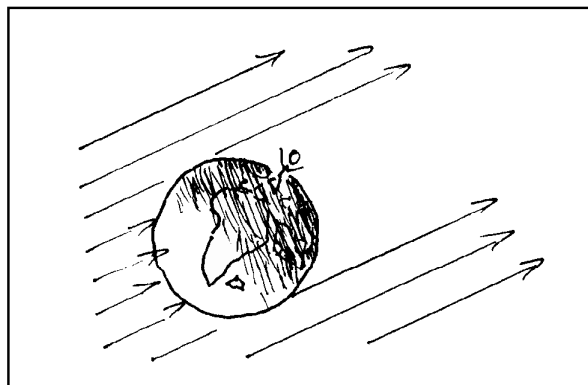


Fig. 21.3. Il cielo notturno è pieno di luce.

Il peso della luce

La luce è molto leggera.

Si potrebbe pensare, e per molto tempo è stato così, che la luce non abbia peso. Ma non è vero. Ora si è addirittura in grado di determinare la massa della luce. La luce emessa in un'ora da una lampadina da 60 W pesa circa 10^{-13} g. Dalla nostra sorgente luminosa principale, il Sole, arrivano quantità di massa abbastanza consistenti. La luce emessa dal Sole in un secondo pesa circa tre miliardi di tonnellate. Il Sole diventa ogni secondo più leggero della stessa quantità.

La compenetrazione della luce

Generiamo due fasci di luce e puntiamoli verso una parete, fig. 21.4a. Ora ruotiamo le due sorgenti luminose in modo che i fasci di luce si intersechino, fig. 21.4b. Cosa succede se interrompiamo uno dei fasci? Il secondo se ne accorge? Non succede assolutamente niente. Evidentemente i raggi di luce possono intersecarsi senza disturbarsi a vicenda. L'uno passa attraverso l'altro.

I raggi di luce si attraversano senza influenzarsi a vicenda.

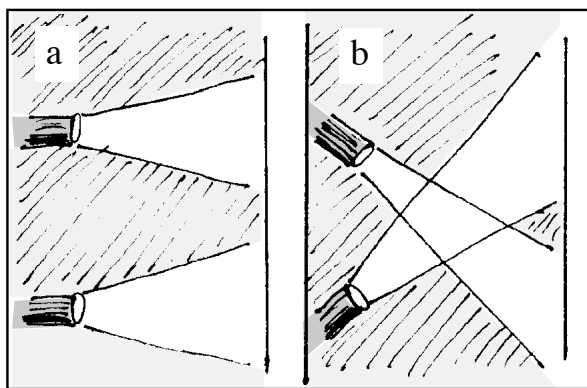


Fig. 21.4. I due fasci di luce non si disturbano.

Luce pura e luce composta - tipi di luce

Se puntiamo un sottile raggio di luce solare bianca o di luce di una lampadina su un prisma di vetro, fig. 21.5, osserviamo due cose degne di nota:

- 1) La luce viene deviata dal prisma, il raggio si piega. Se guardiamo meglio notiamo che fa addirittura due pieghe. Una quando entra nel prisma e una quando esce. All'interno del prisma si muove in linea retta.
- 2) Se a una certa distanza dietro il prisma mettiamo uno schermo bianco, vediamo i colori dell'arcobaleno.

Interpretiamo le osservazioni: la luce bianca contiene diverse componenti, diversi tipi di luce. Ogni tipo di luce stimola una diversa sensibilità nel nostro occhio. Se tutti i tipi di luce giungono contemporaneamente al nostro occhio (più precisamente: se colpiscono tutti lo stesso punto della retina), allora percepiamo il "bianco".

Cosa succede al fascio di luce bianca in un prisma? Il prisma devia i raggi di luce. Ma non devia tutti i tipi allo stesso modo. Così facendo scompone la luce bianca nelle sue componenti.

Possiamo caratterizzare i tipi di luce in base alla percezione del colore che stimolano nel nostro occhio. La fig. 21.6 mostra i tipi di luce ordinati a seconda dell'entità della deviazione nel prisma.

Più tardi vedremo come la percezione del colore non sia un criterio infallibile per la classificazione dei tipi di luce. I nostri occhi sono fatti in modo tale che la stessa percezione può essere provocata in modi diversi.

Inoltre c'è luce alla quale il nostro occhio non reagisce per niente. C'è luce che nel prisma viene deviata meno della luce rossa. Si chiama luce *infrarossa*, fig. 21.7. La luce infrarossa viene emessa da tutti gli oggetti se la loro temperatura è superiore a 0 K. Più alta la temperatura, più luce emettono.

C'è anche luce che nel prisma viene deviata più della luce viola. Si chiama luce *ultravioletta*. Costi-

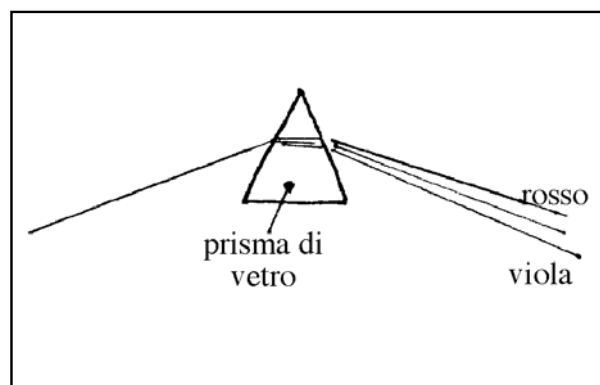


Fig. 21.5. La mescolanza di luce della luce incidente viene scomposta dal prisma nelle sue componenti.

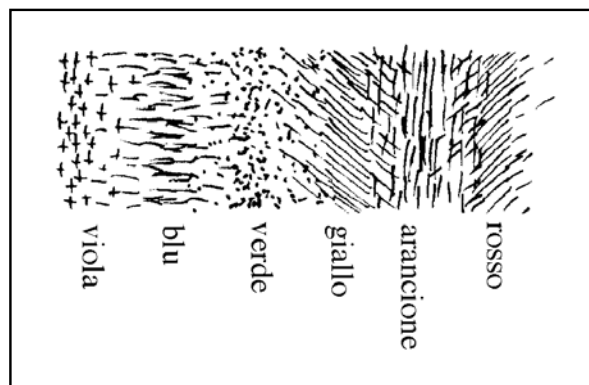


Fig. 21.6. Sequenza dei tipi di luce dopo la scomposizione attraverso il prisma.

tuisce una piccola parte della luce solare e anche di alcune sorgenti luminose artificiali.

Più tardi imparerai che molti altri tipi di radiazione sono dei tipi di luce, alcuni già li conosci:

- i raggi gamma, emessi da molte sostanze radioattive;
- i raggi X;
- le microonde;
- la radiazione usata dai radar;
- le onde radio e TV.

Tutte queste radiazioni sono della stessa natura. Come puoi notare alcune sono chiamate "onde". Effettivamente tutte - quindi anche la luce - hanno qualcosa in comune con le onde dell'acqua. Si dice anche che tutte queste radiazioni sono onde. Il nome completo è *onde elettromagnetiche*. Quindi anche la luce è un'onda elettromagnetica.

In un'onda sull'acqua la distanza tra due "picchi" d'onda si chiama *lunghezza d'onda*, fig. 21.8. (Chiaramente è la stessa distanza che c'è tra due "avvallamenti" dell'onda.) Allo stesso modo anche la luce ha una lunghezza d'onda, diversa per ogni tipo di luce. Ogni tipo di luce è un'onda con una lunghezza d'onda diversa. E la luce composta, per

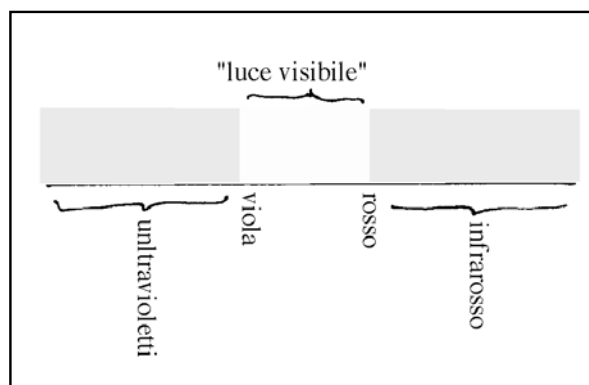


Fig. 21.7. Sullo schermo vengono proiettati dei tipi di luce "invisibile" oltre il rosso e il viola

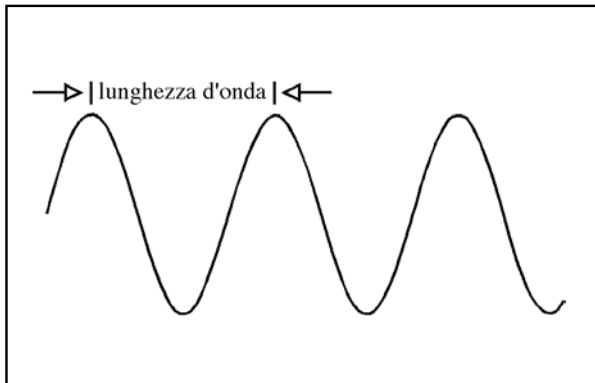


Fig. 21.8. La lunghezza d'onda è la distanza tra due picchi d'onda consecutivi.

esempio la luce bianca, è una mescolanza di onde dalle lunghezze d'onda diverse. Le lunghezze d'onda dei tipi di luce che il nostro occhio riesce a percepire sono estremamente piccole: vanno da 400 nm a 800 nm. "nm" è l'abbreviazione di nanometro. Un nanometro è un milionesimo di millimetro.

La fig. 21.9 mostra la relazione tra colore e lunghezza d'onda.

Per adesso la spiegazione della natura ondulatoria della luce può andare bene. Ci permette solo di distinguere i tipi di luce. Per esempio possiamo dire che un certo laser emette luce di una tal lunghezza d'onda invece di dire semplicemente che la luce è rossa.

Ma non dimenticare che in effetti risponde a meno domande di quante ne ponga di nuove, per esempio: come possiamo stabilire la lunghezza d'onda di un certo tipo di luce? E cos'è di preciso che "fa onda"? Per il momento queste domande sono troppo fuori tema. Ce ne occuperemo più a fondo in futuro.

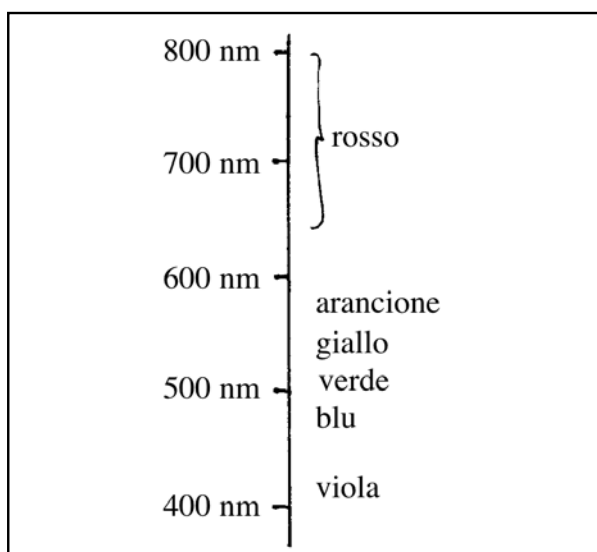


Fig. 21.9. Relazione tra colore e lunghezza d'onda.

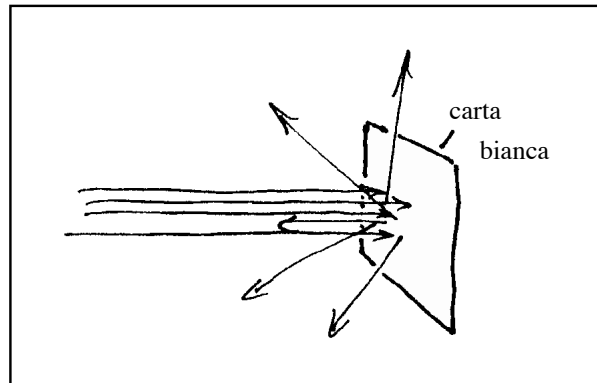


Fig. 21.10. Una superficie bianca e opaca respinge la luce in tutte le direzioni; diffonde la luce.

21.3 Quando la luce incontra la materia.

Luce e aria non si influenzano molto. La luce può attraversare indisturbata l'aria quasi come attraversa il vuoto tra il Sole e la Terra. Lo stesso vale per altri gas.

Se invece la luce colpisce la materia solida o liquida può subire grandi cambiamenti. Sostanzialmente possono succedere due cose:

- può cambiare la sua direzione.
- può cambiare la composizione nei vari tipi di luce.

Cominciamo a occuparci della direzione e di cosa le succede quando la luce colpisce un oggetto. Abbiamo bisogno di luce in una sola direzione, ma non necessariamente di un solo tipo. Quindi usiamo un raggio di luce bianca.

Riflessione e diffusione

Molti oggetti respingono quasi tutta la luce che ricevono. Lo fanno però in modi molto diversi.

Proiettiamo il nostro raggio di luce bianca su un foglio bianco. Il foglio respinge la luce in tutte le direzioni, fig. 21.10. Ce ne rendiamo conto perché tutto il locale si rischiarava un po', riusciamo a vedere le pareti. La luce che ricevono proviene dal lato del foglio illuminato dal nostro raggio di luce. C'è anche un altro modo per capire che il foglio respinge la luce in tutte le direzioni: guardando il foglio vediamo una macchia di luce, indipendentemente dalla direzione dalla quale lo guardiamo.

Questo modo di respingere la luce viene detto *diffusione*. Si dice che la luce incidente viene diffusa dal foglio di carta.

Ora invece di un foglio prendiamo uno specchio, fig. 21.11. Ancora una volta tutta la luce viene respinta - ma questa volta in una sola direzione. Lo capiamo dal fatto che da qualche parte sulla parete c'è un'unica macchia di luce. E anche in questo caso lo

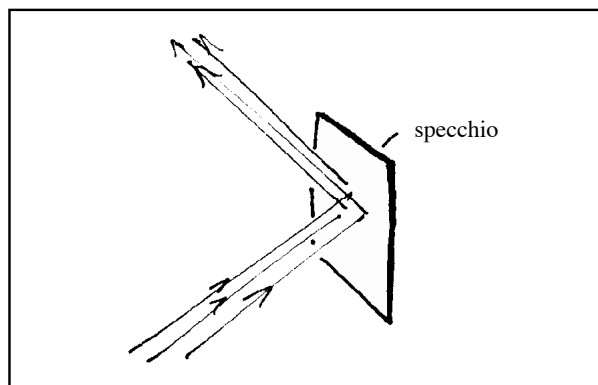


Fig. 21.11. Uno specchio respinge la luce in una sola direzione; riflette la luce.

possiamo verificare in altro modo: guardando lo specchio è quasi impossibile vedere il punto colpito dal raggio di luce - a meno di guardarlo da una direzione ben precisa, cioè la direzione nella quale la luce viene respinta. Attenzione! Non guardare in questa direzione se nell'esperimento si usa un laser. Il raggio laser è così intenso da essere dannoso per gli occhi.

Questo modo di respingere la luce viene detto *riflessione*.

Trasparenza e diffusione

Ci sono corpi che lasciano semplicemente passare la luce: per esempio il vetro di una finestra colpito da un raggio di luce perpendicolare.

Inseriamo perpendicolarmente una lastra di vetro in un raggio di luce e constatiamo che la macchia di luce sulla parete praticamente non cambia, fig. 21.12. Il vetro è *trasparente*.

Anche in questo caso c'è una seconda variante. Una lastra di vetro opaco lascia passare la maggior parte della luce ma la diffonde. E una parte viene anche respinta, fig. 21.13.

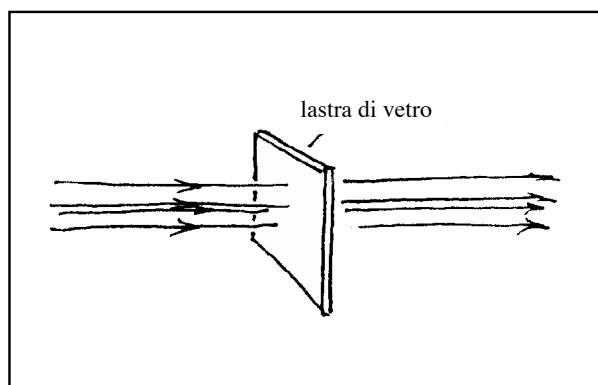


Fig. 21.12. La luce incidente perpendicolare a una lastra di vetro continua dritta.

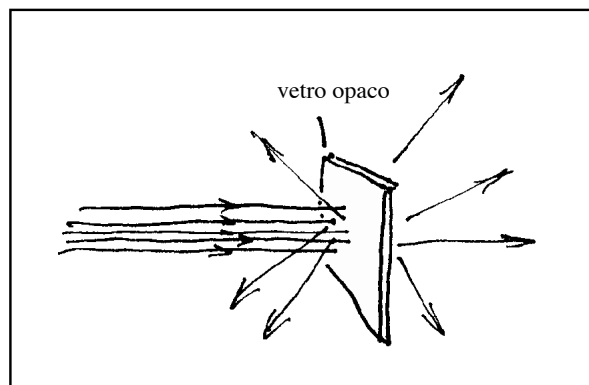


Fig. 21.13. Il vetro opaco lascia passare una parte di luce ma nel contempo la diffonde.

Assorbimento

Puntiamo un raggio di luce su un foglio di carta nero. Sarebbe ancora meglio un pullover di lana nero. Della luce incidente quasi nulla viene respinto e nemmeno passa attraverso. La luce è stata *assorbita* dalla carta rispettivamente dal pullover.

Casi più complessi

Finora abbiamo considerato solo dei casi speciali: la luce veniva interamente riflessa o interamente assorbita o passava tutta attraverso l'oggetto. In generale alla luce non succede una sola di queste cose.

Quasi sempre una parte della luce viene riflessa, una parte riflessa e diffusa, una parte attraversa senza essere diffusa, una parte attraversa e viene diffusa e una parte viene assorbita. A seconda dell'oggetto usato queste parti sono di diversa entità.

Considera ad esempio un foglio di carta grigia e lucida, come una pagina di una rivista, fig. 21.14. La carta respinge molta della luce incidente, in parte riflessa in parte diffusa. La parte riflessa è responsabile dell'aspetto lucido della carta. Un'altra parte viene lasciata passare, quasi esclusivamente diffusa. Infine il resto viene assorbito dalla carta. Se nulla fosse assorbito la carta sarebbe bianca e non grigia.

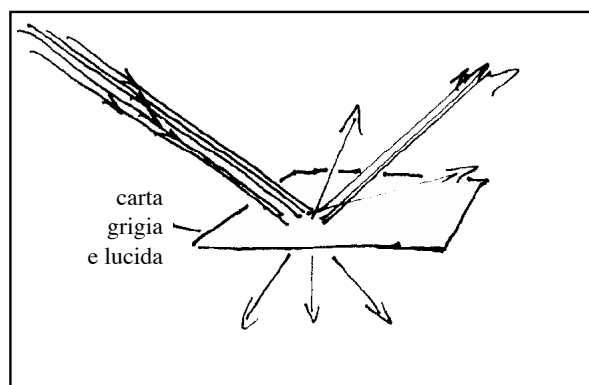


Fig. 21.14. La carta grigia e lucida in parte riflette, in parte diffonde e in parte lascia passare la luce.

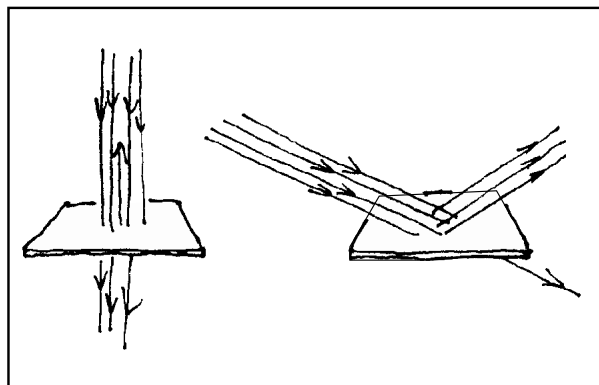


Fig. 21.15. Se la luce colpisce il vetro perpendicolarmente, la maggior parte passa attraverso; se lo colpisce quasi parallelamente, la maggior parte viene riflessa.

Ma c'è un'altra complicazione. Ciò che succede alla luce quando colpisce un oggetto dipende anche dall'angolo con il quale lo colpisce.

La stessa lastra di vetro che lascia passare quasi tutta la luce perpendicolare riflette quasi tutta la luce quando l'angolo d'incidenza è molto piccolo, fig. 21.15. Puoi convincertene provando anche tu.

Infine tutto quello che abbiamo detto dipende anche dal tipo di luce usata. E questo è molto importante.

Una maglietta riceve luce bianca, cioè una mescolanza di tutti i tipi di luce. La maglietta assorbe tutti i tipi di luce tranne quella blu, fig. 21.16. Dalla maglietta fuoriesce solo luce blu. Diciamo: "la maglietta è blu". Cosa vediamo se illuminiamo la maglietta con un raggio di luce rossa? La luce rossa viene assorbita. Altra luce non ce n'è, quindi niente viene riflesso e la maglietta ci appare nera.

Esattamente come oggetti diversi riflettono in modo diverso tipi diversi di luce, alcuni oggetti lasciano passare tipi diversi di luce più o meno bene. I vetri colorati ne sono un esempio, fig. 21.17. Il vetro verde di una bottiglia di limonata lascia passare la luce verde e assorbe il resto.

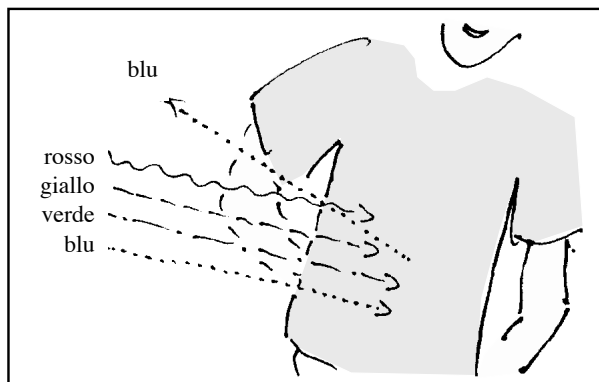


Fig. 21.16. La maglietta assorbe tutta la luce tranne quella blu. La luce blu viene respinta e diffusa.

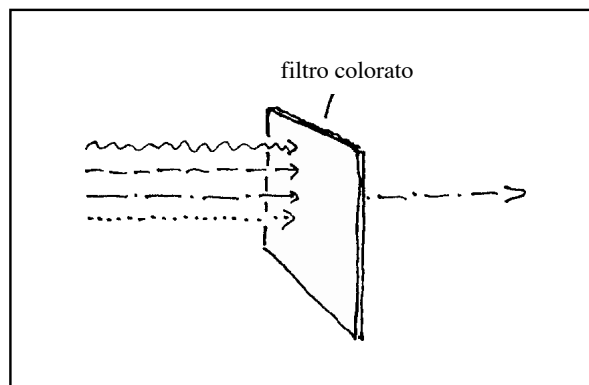


Fig. 21.17. Il vetro colorato assorbe tutta la luce tranne quella verde. La luce verde passa attraverso.

È interessante mettere l'uno dietro l'altro dei vetri di vario colore, i cosiddetti *filtri colorati*, fig. 21.18. Due filtri che lasciano passare luce di un solo colore, ma non lo stesso per entrambi i filtri, non lasceranno passare più nulla se posti uno dietro l'altro.

Altro fenomeno interessante ma abbastanza raro: un oggetto lascia passare un tipo di luce e respinge tutti gli altri. Una lastra con queste caratteristiche apparirà di colore diverso se la guardiamo dal lato dove arriva la luce o dal lato opposto, fig. 21.19.

Questa era una carrellata sui vari fenomeni osservabili quando la luce colpisce un oggetto.

Sapresti descrivere cosa succede alla luce solare che colpisce una mela rossa? O la foglia leggermente trasparente di un albero?

Esercizi

1. La luce del Sole colpisce una mela rossa. Cosa succede alla luce?
2. La luce del Sole colpisce una foglia d'albero leggermente trasparente. Cosa succede alla luce?

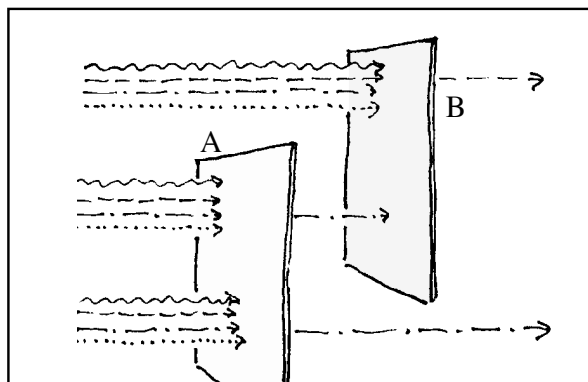


Fig. 21.18. Il filtro A lascia passare solo luce verde, il filtro B solo luce gialla. I filtri posti uno dietro l'altro non lasciano passare nulla.

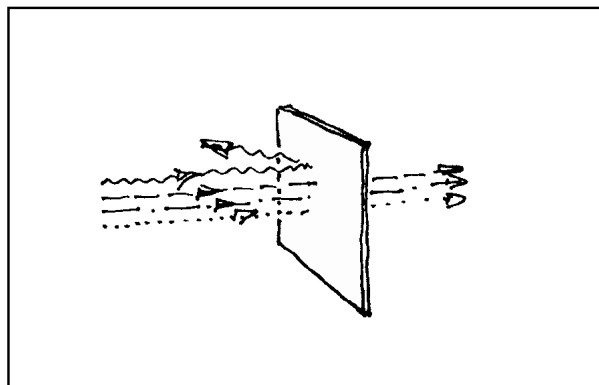


Fig. 21.19. Alcuni filtri colorati riflettono la luce che non lasciano passare.

3. Un pullover di colore rosso scuro appare nero quando è illuminato dalla luce blu di un'insegna pubblicitaria. Come è possibile?
4. Esistono dei fogli da imballaggio argentati che in controluce sono parzialmente trasparenti. Cosa succede alla luce che colpisce il foglio?
5. La luce della lampada di un proiettore per diapositive colpisce una diapositiva. Cosa succede alla luce?
6. Una cartolina postale colorata è illuminata normalmente. Cosa succede alla luce?
7. In un paese si è costruito un municipio senza finestre. Per rischiarare l'interno gli abitanti vogliono catturare la luce con dei sacchi e portarla dentro. Perché non funziona?

21.4 Luce diffusa e luce coerente.

Immaginiamo un piccolo volume V da qualche parte nel mezzo di un locale, fig. 21.20. Che raggi di luce passano nel volume? La luce giunge da tre direzioni. Da destra ne arriva molta, dalle varie direzioni della finestra; anche dalle pareti ne arriva parecchia. Invece dal basso, dal pavimento scuro, ne arriva poca. Da qualche parte nel locale c'è un oggetto nero. Da quella direzione praticamente di luce non ne arriva.

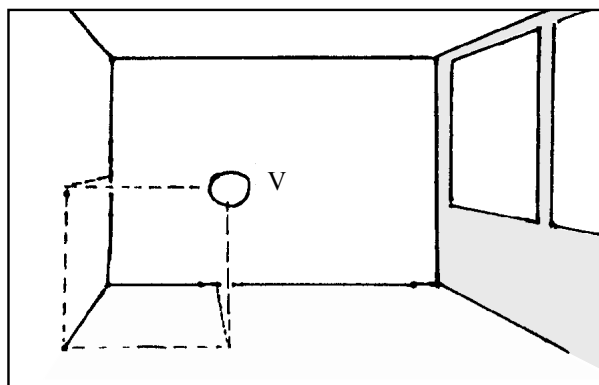


Fig. 21.20. Il volume V è attraversato da quale luce?

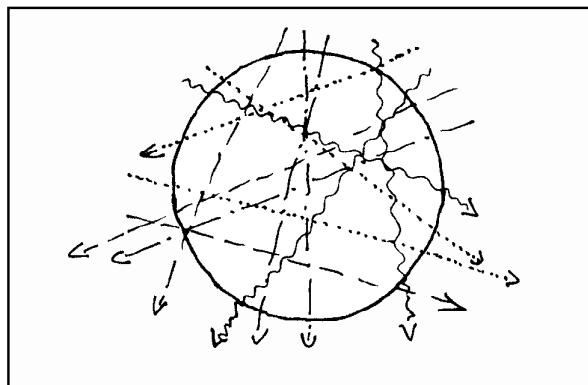


Fig. 21.21. Luce diffusa di diversi colori.

Per descrivere la luce nel volume V non basta dire quanta luce passa in ogni direzione. Dobbiamo anche specificare quali tipi di luce ci sono. Dal lato della finestra arriva luce di tutti i tipi, mentre dalla pareti dipinte di blu arriva solamente luce blu.

Consideriamo alcune situazioni particolari.

È una giornata uggiosa. Usciamo dal locale con il nostro volume V . In fig. 21.21 abbiamo ingrandito una sezione di V . Sono indicati parecchi tipi di luce. Raggi di luce di tipo diverso sono rappresentati da linee con un diverso tratteggio. Notiamo: arriva luce dall'alto, da destra e da sinistra, in poche parole da tutte le direzioni del "semispazio superiore". Se in un punto c'è luce proveniente da molte direzioni, si dice che lì la luce è *diffusa*.

Immaginiamo ora che sopra le nuvole ci sia un enorme filtro colorato. A terra arriva solo luce di un tipo. La luce che avremmo nel volume V è rappresentata in fig. 21.22. È sempre diffusa, ma a differenza di prima è tutta dello stesso colore, o *monocromatica*.

Un'altra situazione semplice: è notte e c'è solo una lampadina lontana da noi e quindi da V , fig. 21.23. La fig. 21.24 mostra la distribuzione della luce in V . Tutti i raggi di luce hanno la stessa direzione.

Inoltre mettiamo un filtro colorato davanti alla sorgente luminosa. La luce nel volume V è mostrata

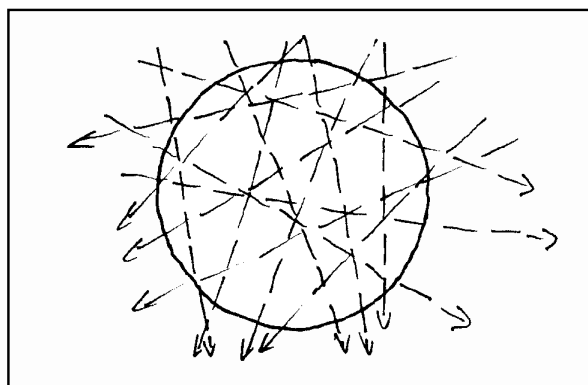


Fig. 21.22. Luce diffusa monocromatica.

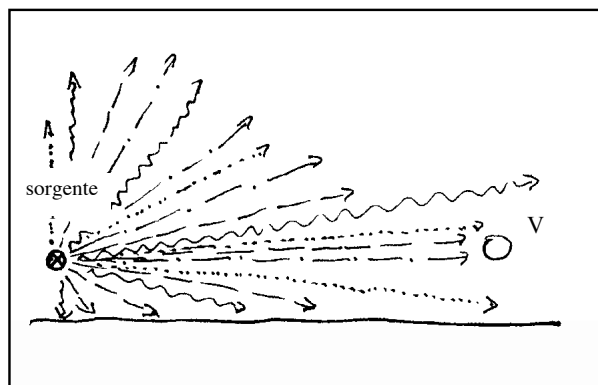


Fig. 21.23. La luce nel volume V ha una sola direzione.

in fig. 21.25. È monocromatica e ha una sola direzione. È la luce più pura che ci si possa immaginare. Non è né una mescolanza di vari tipi di luce come in fig. 21.24, né una mescolanza di luce di varie direzioni come in fig. 21.22. E non è assolutamente una mescolanza di vari tipi in varie direzioni come in fig. 21.21.

Una luce del genere, omogenea sia per tipo di luce che per direzione, viene detta *luce coerente*. È particolarmente adatta alla sperimentazione.

Luce coerente: un solo tipo di luce, una sola direzione.

Dopo le considerazioni fatte dovresti sapere come ottenere luce coerente. Possiamo avere una piccola sorgente di luce a una grande distanza e metterle davanti un filtro colorato. Spesso si procede come descritto in fig. 21.26: la sorgente luminosa non è a grande distanza ma le direzioni “sbagliate” vengono eliminate. Con entrambi i metodi si ottiene luce coerente ma molto debole, con poca *intensità*. C'è un modo molto più elegante di ottenere luce coerente e molto intensa: usando un *laser* come sorgente di luce. La luce laser si distingue per il fatto di essere coerente per natura. Così abbiamo anche scoperto cos'ha di particolare la luce laser:

La luce laser è coerente.

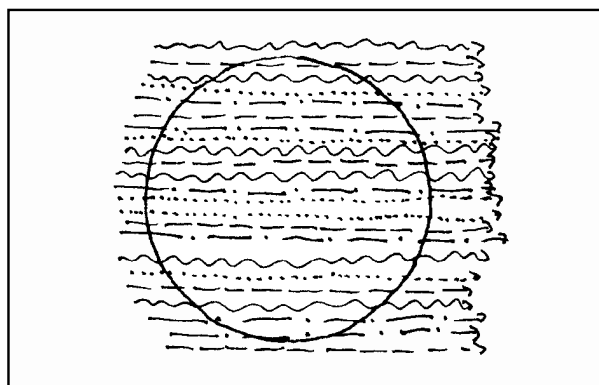


Fig. 21.24. Luce di direzione uniforme.

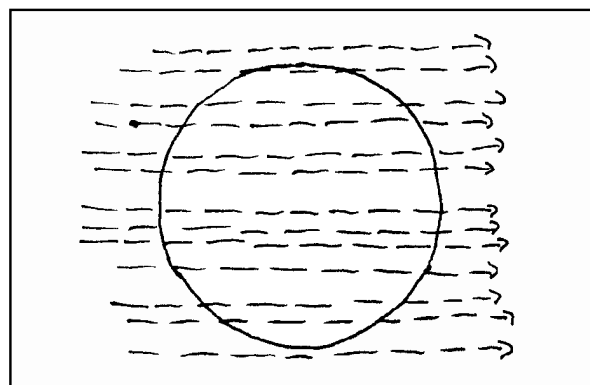


Fig. 21.25. Luce coerente: unica direzione e unico colore.

Esercizi

1. C'è tanta nebbia da “non vedere a un palmo dal naso”. Com'è distribuita la luce in un piccolo volume in mezzo alla nebbia?
2. Di notte due automobili si avvicinano a un incrocio da direzioni perpendicolari. Com'è distribuita la luce nella zona dell'incrocio (visto dall'alto)?
3. Sei sulla strada ed è buio. Molto lontano davanti a te vedi le luci posteriori di un'auto. Com'è distribuita la luce davanti a te?

21.5 La legge della riflessione

Puntiamo un raggio di luce su uno specchio. La luce è riflessa, viene deviata in una direzione ben precisa. Da cosa dipende questa direzione? Come possiamo modificarla?

Ci accorgiamo subito che la direzione del raggio di luce riflessa dipende dalla direzione del raggio di luce incidente. Se misuriamo i due angoli, l'*angolo di incidenza* e l'*angolo di riflessione*, constatiamo che sono uguali, fig. 21.27.

Notiamo anche che il raggio incidente e quello riflesso giacciono sullo stesso piano, perpendicolare alla superficie dello specchio. Immaginiamo di tracciare la normale al piano dello specchio nel punto di incidenza del raggio di luce. Quindi:

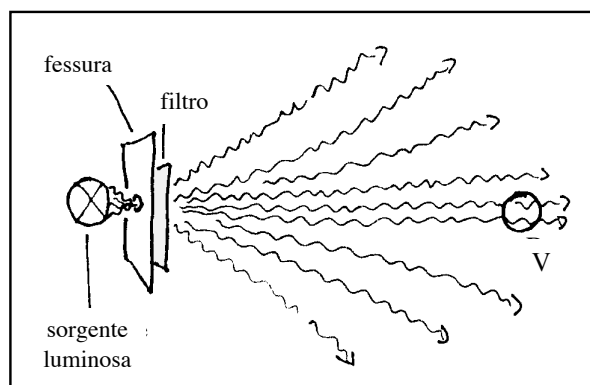


Fig. 21.26. In questo modo si può ottenere luce coerente.

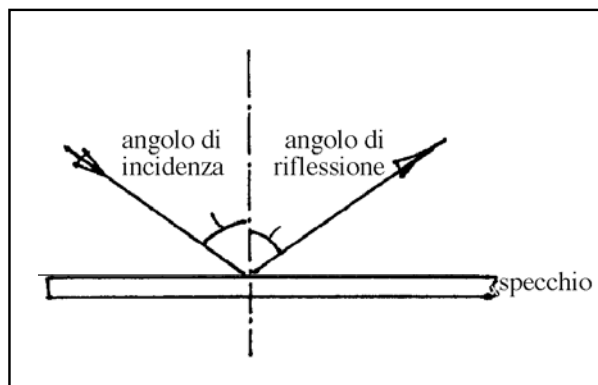


Fig. 21.27. L'angolo di incidenza e l'angolo di riflessione sono uguali.

Raggio incidente, raggio riflesso e normale al piano, giacciono nello stesso piano.

Angolo di incidenza = angolo di riflessione.

Queste affermazioni costituiscono la cosiddetta legge della riflessione.

Esercizi

1. La fig. 21.28a mostra due specchi piani perpendicolari visti dall'alto. Da sinistra in basso arriva luce parallela. Disegna il percorso dei raggi A e B.

2. La fig. 21.28b mostra uno specchio a superficie ricurva colpito da luce a una sola direzione. Per ogni punto della superficie la normale giace nel piano del foglio. Traccia il percorso dei raggi A e B.

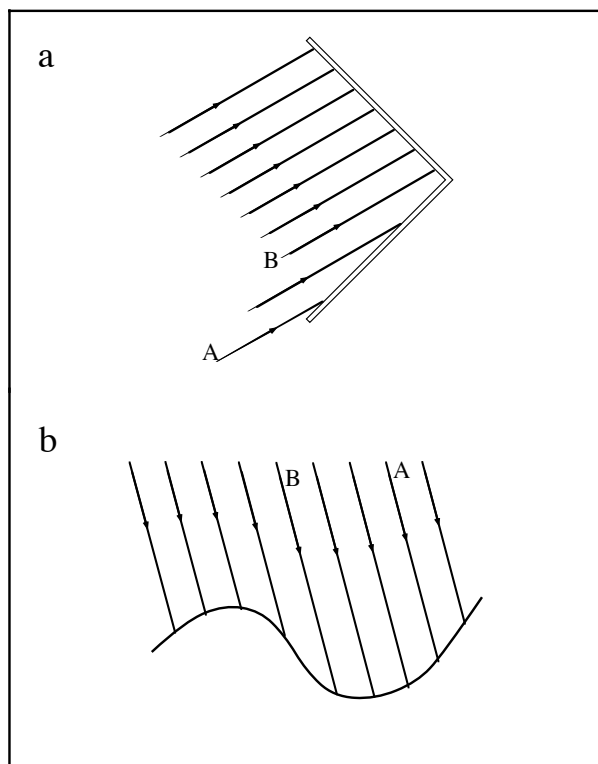


Fig. 21.28. Per gli esercizi 1 e 2

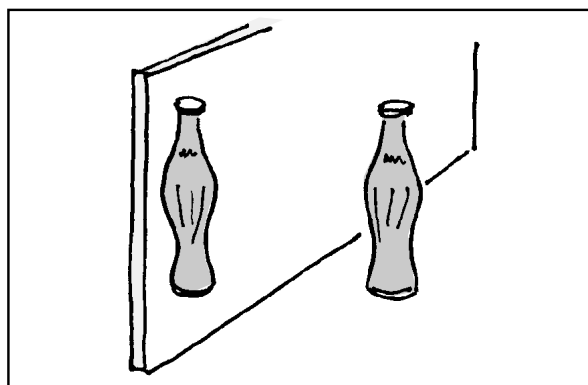


Fig. 21.29. Sembra che al di là dello specchio ci sia un'altra bottiglia.

21.6 Lo specchio piano

La fig. 21.29 mostra una bottiglia davanti a uno specchio. Vediamo la bottiglia davanti allo specchio e vediamo una seconda bottiglia che sembra trovarsi dietro lo specchio. La "bottiglia fantasma" è alla stessa distanza dallo schermo della bottiglia messa davanti. Lo si nota chiaramente usando un righello, fig. 21.30. Inoltre la falsa bottiglia si trova esattamente sul prolungamento della retta perpendicolare allo specchio che passa per la bottiglia vera.

Come si forma questa "immagine riflessa"?

Per capirlo basta applicare la legge della riflessione. Sia P un punto qualsiasi di un oggetto. Da P partono raggi di luce in tutte le direzioni. Tre di questi raggi sono disegnati in fig. 21.31. Tutti e tre colpiscono lo specchio. Inoltre sono disegnati anche i rispettivi raggi riflessi. Ora, se li prolunghiamo dietro allo specchio - le linee tratteggiate - i raggi riflessi si incontrano in un punto P'. I raggi riflessi provengono dai diversi punti A, B e C sulla superficie dello specchio. Ma sembrano provenire tutti da un punto P' che si trova dietro lo specchio.

In fig. 21.32 lo specchio è stato sostituito con una finestra aperta. Laddove in fig. 21.31 sembrava esserci il punto P', in fig. 21.32 c'è davvero un punto che emette luce. La luce che esce dalla finestra in

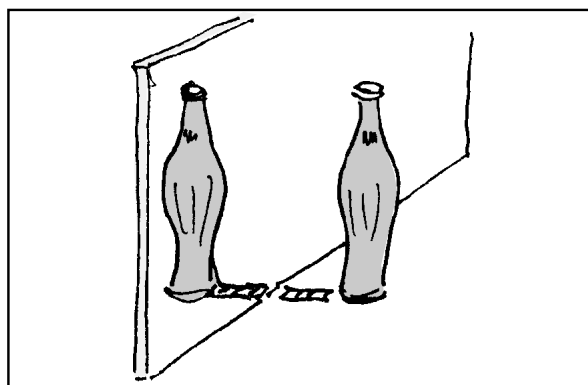


Fig. 21.30. La bottiglia "finta" è alla stessa distanza dallo specchio della bottiglia "vera".

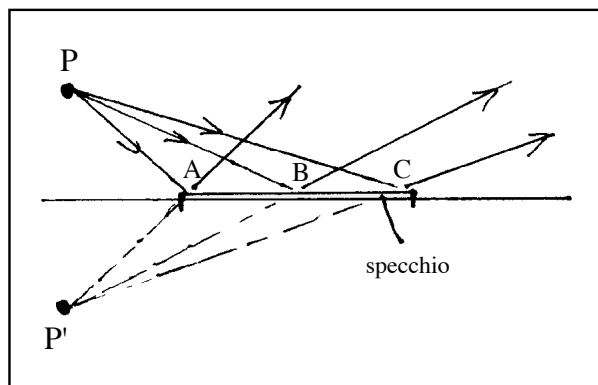


Fig. 21.31. I raggi riflessi sembrano provenire dal punto P'.

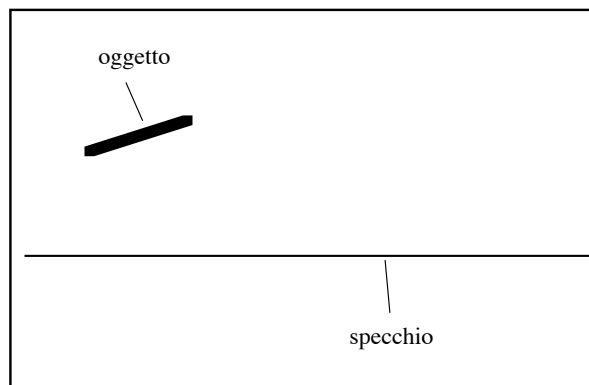


Fig. 21.33. Per l'esercizio

fig. 21.32 è indistinguibile dalla luce proveniente dallo specchio in fig. 21.31.

Esercizio

La fig. 21.33 mostra uno specchio visto dall'alto e un oggetto a forma di sbarra. Determina la posizione dell'oggetto apparente dietro lo specchio. Disegna i raggi.

21.7 Lo specchio parabolico

Spesso si ha bisogno di avere molta luce in un unico punto. Vogliamo concentrare in uno spazio ridotto la luce che proviene da varie direzioni. Per capire come riuscirci facciamo un esempio.

Vogliamo riscaldare con luce solare la caldaia di una centrale elettrica. Se piazziamo la caldaia alla luce del Sole si riscalderà appena, la luce è troppo poca. Dovremmo in qualche modo raccogliere la luce che arriva su una grande superficie. Lo si fa con l'aiuto di specchi, fig. 21.34.

Ogni specchio è orientato in modo da riflettere la luce verso la caldaia. Per poter concentrare la maggior quantità possibile di luce solare, la caldaia viene posta in cima a una torre.

In linea di massima, invece di molti specchi piccoli si potrebbe usare un unico grande specchio, fig. 21.35. Uno specchio grande a sufficienza per servire una centrale elettrica sarebbe ovviamente poco pratico e non avrebbe vantaggi. Per un dispositivo più piccolo invece il metodo è molto pratico.

Quando la luce proviene da una sola direzione, cioè quando si tratta di luce parallela, la si può concentrare in un punto grazie a uno specchio, a condizione che lo specchio abbia la forma giusta: la sezione della sua superficie deve essere una parabola. Uno specchio del genere si chiama *specchio parabolico*.

La luce che colpisce lo specchio parallela al suo asse di simmetria viene riflessa in un solo punto. Questo punto si chiama *fuoco* dello specchio.

Visto che la luce solare non è del tutto parallela, non si concentra in un solo punto ma in una piccola macchia.

Con uno specchio parabolico si può concentrare la luce parallela in un solo punto. Ma si può usare lo specchio anche al contrario, per rendere parallela la luce proveniente da un solo punto.

Prendiamo una sorgente luminosa "più puntiforme possibile", per esempio una lampadina con un filo incandescente molto compatto. Mettiamo la lampa-

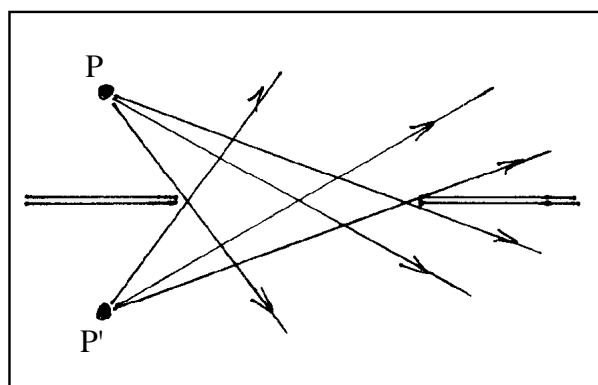


Fig. 21.32. La distribuzione della luce al di sopra della finestra è uguale a quella sopra lo specchio in fig. 21.31.

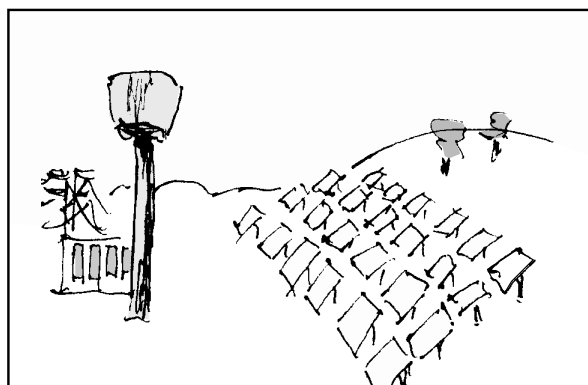


Fig. 21.34. Centrale solare: gli specchi concentrano la luce sulla caldaia in cima alla torre.

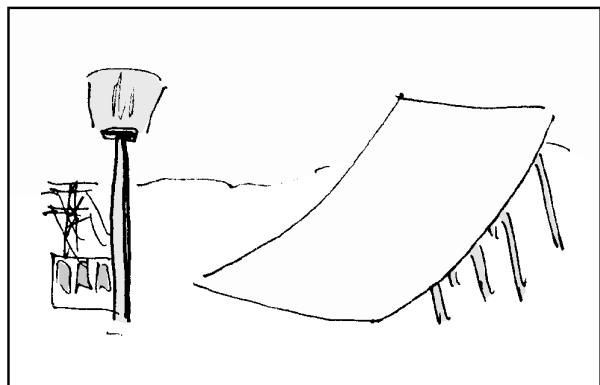


Fig. 21.35. Gli specchi in fig. 21.34 potrebbero essere sostituiti da un unico, grande specchio ricurvo.

dina nel fuoco di uno specchio con la massima precisione possibile. Lo specchio riflette in modo (quasi) parallelo la luce ricevuta. Abbiamo costruito un faro, come quelli di un'auto o di una torcia elettrica.

Gli specchi parabolici hanno molte altre applicazioni. Sono usati in entrambi i modi: per concentrare la luce parallela in un punto, ma anche per rendere parallela la luce proveniente da una sorgente molto piccola, quindi praticamente puntiforme. Molto spesso li si usa per luce al di fuori della gamma di luce visibile. Li si usa come antenna emittente o ricevente per i tipi più svariati di onda elettromagnetica.

Lo specchio parabolico di un'antenna emittente produce un fascio di "luce" abbastanza parallela a partire dall'emissione di un'antenna praticamente puntiforme. Lo specchio di un'antenna ricevente raccoglie la radiazione incidente e la concentra sull'antenna ricevente, di solito molto piccola.

Antenne emittenti e riceventi del genere si trovano su qualsiasi ripetitore. Grazie a loro i programmi

televisivi e radiofonici, così come le conversazioni telefoniche, vengono trasmessi da un ripetitore all'altro.

Le antenne paraboliche sono usate anche per spedire e ricevere dati dai satelliti. La ricezione della televisione satellitare si fa grazie a un'antenna con uno specchio parabolico.

Lo specchio parabolico del radar di un aeroporto serve sia a emettere che a ricevere, fig. 21.36. Produce un raggio relativamente sottile di onde elettromagnetiche. Visto che l'antenna gira, il raggio si muove in circolo. La "luce" che emette viene respinta solo dai metalli. Se il raggio colpisce per esempio un aereo, viene respinto, concentrato dallo specchio parabolico e ricevuto dalla vera e propria antenna nel fuoco dello specchio. Così si capisce in che direzione si trova l'aereo.

Torniamo alla luce normale.

Cosa fa il nostro campo di specchi in fig. 21.34 quando il tempo è coperto? Consideriamo un singolo specchio. Riflette verso la caldaia solo la luce proveniente da una certa direzione. La maggior parte della luce incidente è riflessa in altre direzioni e va persa. Possiamo ruotare lo specchio quanto vogliamo - la maggior parte della luce non colpisce la caldaia.

Lo stesso vale anche per gli specchi parabolici. Non esistono specchi in grado di concentrare la luce diffusa.

La luce diffusa non si può concentrare.

Esercizio

Lo specchio parabolico in fig. 21.37 riceve luce diffusa. Dimostra che lo specchio non concentra la luce e non la rende parallela.

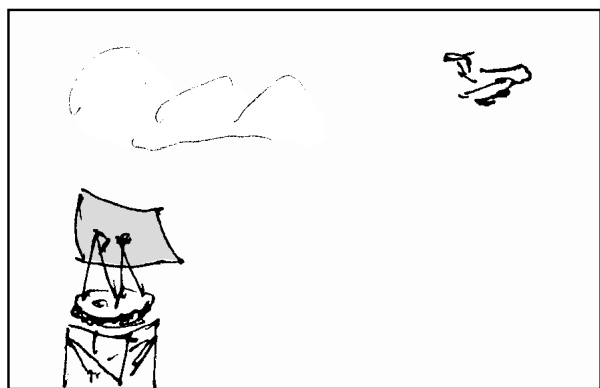


Fig. 21.36. Antenna radar.

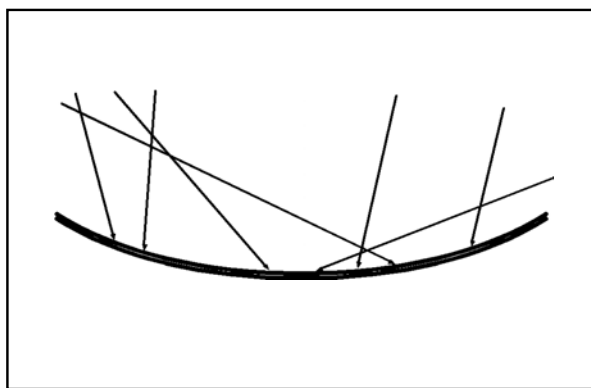


Fig. 21.37. Per l'esercizio

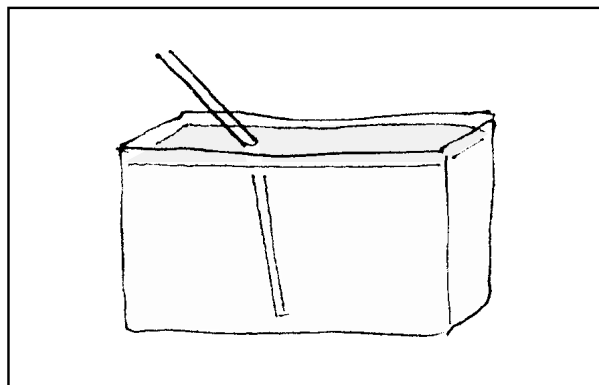


Fig. 21.38. Il fascio di luce viene deviato dall'entrata in acqua.

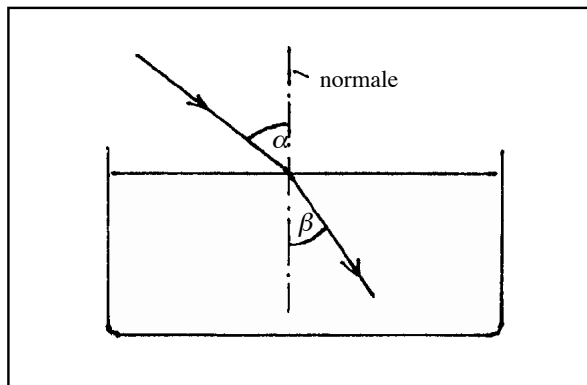


Fig. 21.39. Entrando in acqua la luce viene rifratta verso la normale alla superficie.

21.8 La rifrazione

Per gli esperimenti descritti più avanti abbiamo bisogno di un raggio sottile di luce.

Riempiamo un acquario e aggiungiamo all'acqua qualche goccia di latte per renderla un po' torbida. Ora quando la luce attraversa l'acqua vediamo bene quale percorso segue.

Dall'alto puntiamo il raggio di luce nell'acqua, fig. 21.38. La considerazione più importante: entrando in acqua il raggio viene deviato - a meno che entri perpendicolarmente. Più inclinato è il raggio, maggiore sarà la deviazione.

Questa deviazione dei raggi di luce viene detta *rifrazione*. Si dice che la luce viene rifratta.

In fig. 21.39 sono rappresentati il raggio incidente e quello rifratto. Nel punto di entrata nell'acqua è tracciata anche la normale. Chiamiamo α l'angolo tra la normale e il raggio incidente e β l'angolo tra la normale e il raggio rifratto.

Così possiamo dire che nel passaggio aria \rightarrow acqua la luce viene rifratta verso la normale. Constatiamo anche che il raggio incidente e quello rifratto giacciono in un piano perpendicolare alla superficie rifrangente. In altre parole: raggio incidente, raggio rifratto e normale al piano di rifrazione giacciono sullo stesso piano.

Un raggio di luce viene rifratto anche nel passaggio dall'aria a un altro materiale trasparente. Quanto viene rifratto dipende dal materiale. Nel passaggio dall'aria al vetro la luce viene rifratta più che nel passaggio dall'aria all'acqua. E nel diamante la rifrazione è maggiore che nel vetro.

La tabella 21.1 riassume i valori di α e β per l'acqua, il vetro e il diamante.

Restano alcune questioni da chiarire. Cosa succede alla luce che dall'acqua passa all'aria? Invece di mettere la sorgente luminosa nell'acqua - non le farebbe molto bene - usiamo un trucco. Lasciamo la sorgente fuori dall'acqua ma in acqua mettiamo uno

specchio perpendicolare alla direzione del raggio di luce. Quindi la luce colpisce lo specchio e torna indietro. Cosa succede quando il raggio di luce raggiunge la superficie? L'esperimento lo dimostra chiaramente: viene rifratto di nuovo - nella stessa direzione dalla quale era venuto, fig. 21.40.

Quindi: entrando in acqua la luce viene rifratta verso la normale, uscendo dall'acqua viene rifratta allontanandola dalla normale.

Lo stesso vale per altre sostanze trasparenti. Possiamo direttamente dedurre cosa succede a un raggio di luce che attraversa di sbieco una lastra di vetro, fig. 21.41. Entrando viene deviato verso la normale, uscendo viene deviato nell'altro senso. Quindi nel complesso viene solo traslato lateralmente.

Cosa succede alla luce che entra nel vetro proveniente da un mezzo diverso dall'aria? Per un caso speciale è facile rispondere: per luce che proviene dal vetro ed entra nel vetro, fig. 21.42. Quando esce dal blocco di sinistra viene deviata verso la normale. Subito dopo, entrando nell'altro blocco di vetro, viene rideviata nella direzione iniziale. Quindi nel complesso non succede niente.

Tabella 21.1

α	β		
	acqua	vetro	diamante
0°	0°	0°	0°
10°	7,5°	6,6°	4,1°
20°	14,9°	13,2°	8,1°
30°	22,1°	19,5°	11,9°
40°	28,9°	25,4°	15,4°
50°	35,2°	30,7°	18,5°
60°	40,6°	35,3°	21,0°
70°	45,0°	38,8°	22,8°
80°	47,8°	41,0°	24,0°
90°	48,8°	41,8°	24,4°

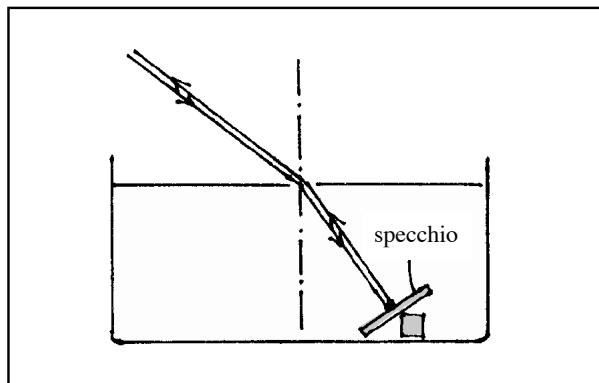


Fig. 21.40. Uscendo dall'acqua il raggio di luce riprende la direzione iniziale.

Nel frattempo abbiamo scoperto:

Passaggio aria \rightarrow vetro: forte rifrazione;

Passaggio vetro \rightarrow vetro: nessuna rifrazione.

Il passaggio acqua \rightarrow vetro è una situazione intermedia tra queste due: la luce non viene deviata tanto come quando proviene dall'aria ma più di quando proviene dal vetro. Quindi:

Passaggio acqua \rightarrow vetro: debole rifrazione.

Diciamo che le diverse sostanze hanno una *densità ottica* diversa. Delle tre sostanze elencate in tabella 21.1 quella otticamente più densa è il diamante. Seguono il vetro e poi l'acqua. L'aria ha una densità ottica ancora inferiore. E la densità ottica del vuoto è ancora minore di quella dell'aria. La differenza tra la densità ottica dell'aria e del vuoto è piccolissima.

Quindi abbiamo la regola:

Nel passaggio da un materiale A a un materiale B la luce viene deviata verso la normale se la densità ottica di B è più grande di quella di A. Se la densità ottica di B è inferiore di quella di A, viene deviata lontano dalla normale.

Tra l'altro la densità ottica dell'aria (e di altri gas) dipende dalla sua normale densità (massa su volu-

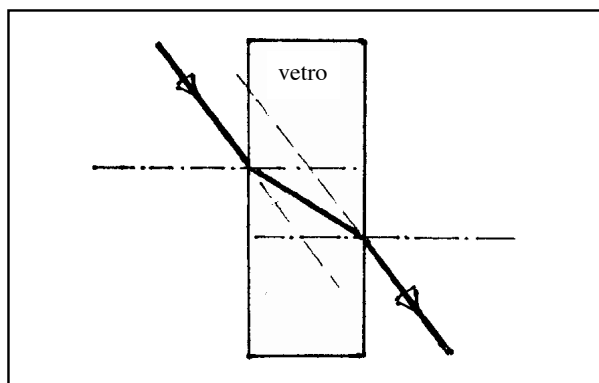


Fig. 21.41. Attraversando una lastra di vetro un raggio di luce viene traslato lateralmente.

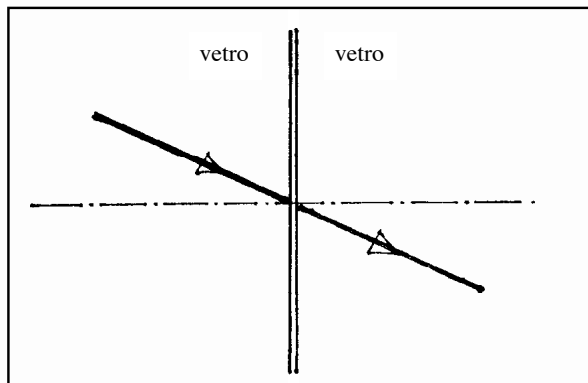


Fig. 21.42. Nella transizione da vetro a vetro la direzione della luce non cambia.

me). La normale densità può essere modificata riscaldando l'aria. L'esperimento descritto in fig. 21.43 si basa su questo fatto.

Un raggio laser passa molto vicino sopra una piastra di cottura e colpisce il muro. Se soffiando sopra la piastra (attenzione! Non guardare il raggio laser), la macchia di luce sulla parete si muove. Come se soffiassimo via il raggio laser. In effetti soffiando via solo l'aria calda. In questo modo scompare il passaggio tra aria calda e aria fredda che causava una piccola rifrazione del raggio laser.

La differenza di densità ottica e la conseguente rifrazione della luce è anche la causa dell'apparente sfarfallio dell'immagine di un oggetto osservato al di sopra di una sorgente di calore.

Esercizi

1. Rappresenta la relazione tra α e β per l'acqua, il vetro e il diamante in un sistema di coordinate α - β .
2. La fig. 21.44a mostra un raggio di luce che passa dall'aria al vetro. Disegna il raggio rifratto.

Nella fig. 21.44b un raggio di luce passa nuovamente dall'aria al vetro. Disegna il raggio incidente.

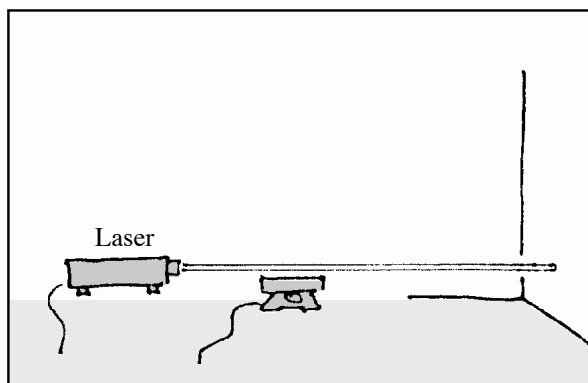


Fig. 21.43. L'aria calda sopra la piastra di cottura ha una densità inferiore all'aria circostante. Quindi anche la densità ottica è inferiore.

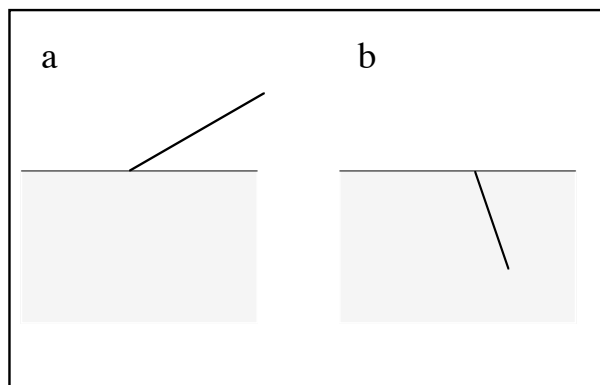


Fig. 21.44. Per l'esercizio 2

21.9 Il prisma

Nel paragrafo precedente abbiamo visto: un raggio di luce che passa attraverso una lastra di vetro (con superfici parallele) viene traslato lateralmente, fig. 21.41. Modifichiamo leggermente la situazione. Il raggio di luce deve attraversare un corpo di vetro le cui superfici non sono più parallele. Il corpo più semplice di questo tipo è il prisma a sezione triangolare, fig.21.45.

Il raggio viene rifratto due volte: quando entra nel prisma e quando ne esce. Tutti i raggi e le normali giacciono nello stesso piano, parallelo alle basi del prisma. Questo piano è rappresentato in fig. 21.46.

Notiamo come la luce che esce dal prisma non ha più la stessa direzione di quella che entra (a differenza della lastra di vetro). Subisce una deviazione netta. L'entità di questa deviazione dipende dall'angolo di incidenza della luce sul prisma.

Già in precedenza avevamo sfruttato il fatto che un prisma devia lunghezze d'onda diverse (tipi di luce diversi) in modo diverso.

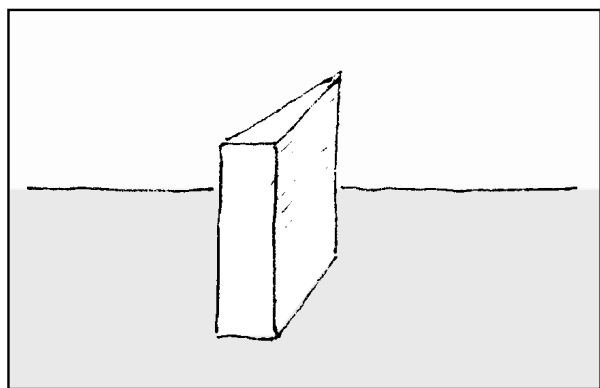


Fig. 21.45. Prisma a base triangolare.

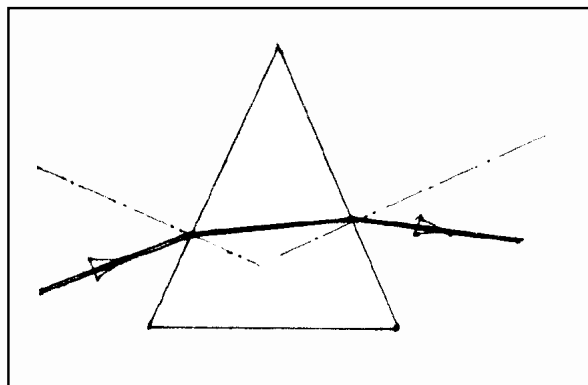


Fig. 21.46. Dopo due rifrazioni, la direzione della luce è cambiata.

Esercizi

1. Un prisma di vetro ha per base un triangolo equilatero, fig. 21.47. Luce parallela colpisce il prisma da sinistra. Determina la direzione della luce quando esce dal prisma.
2. Due prismi identici vengono affiancati, fig. 21.48. Che direzione ha la luce dopo aver attraversato i due prismi?

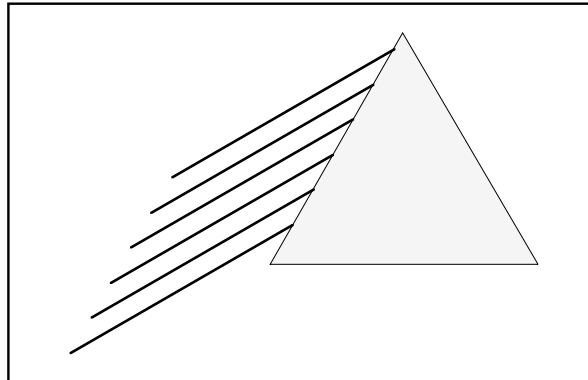


Fig. 21.47. Per l'esercizio 1

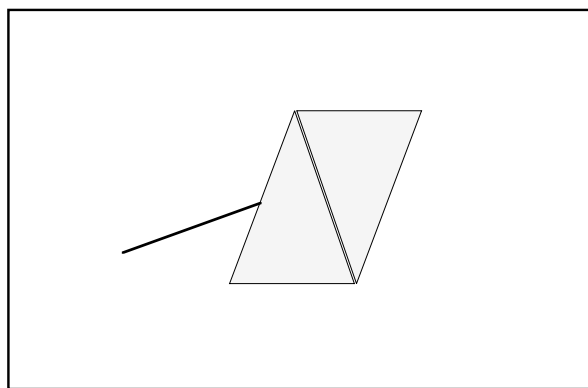


Fig. 21.48. Per l'esercizio 2

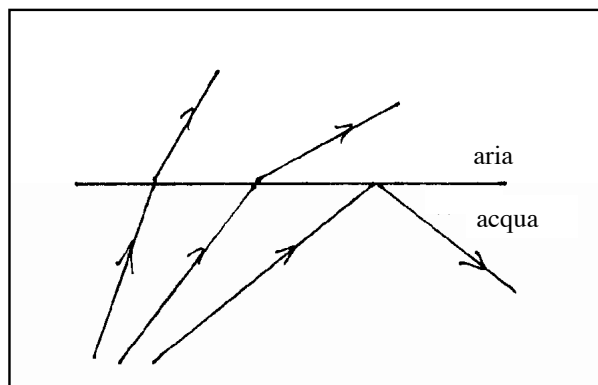


Fig. 21.49. La luce incidente la superficie dalla parte dell'acqua subisce una riflessione totale se l'angolo d'incidenza è superiore a $48,8^\circ$.

21.10 Riflessione totale

La tabella 21.1 ci dice che un raggio di luce che entra nell'acqua con un angolo α di quasi 90° , prosegue con un angolo di $48,8^\circ$ rispetto alla normale. Questi numeri significano anche che un raggio di luce che nell'acqua forma un angolo di $48,8^\circ$ con la normale, quando passa nell'aria si muove praticamente parallelo alla superficie. Cosa succede allora a un raggio di luce che dall'interno dell'acqua incide sulla superficie con un angolo ancora maggiore? Non può più uscire. Viene riflesso all'interno, secondo la legge della riflessione, fig. 21.49. Questo fenomeno viene detto *riflessione totale*.

Questa riflessione non si manifesta improvvisamente non appena l'angolo β raggiunge i $48,8^\circ$. Già prima solo una parte della luce viene rifratta; il resto viene riflesso. E più il raggio è "ripido", più piccolo l'angolo con la normale, minore sarà la parte riflessa.

I conduttori ottici sono un'applicazione importante della riflessione totale. Un conduttore ottico è una lunga e flessibile fibra di vetro. La luce che entra con un piccolo angolo rispetto alla normale, fig. 21.50, non può più uscire dal conduttore, viene totalmente riflessa. Quindi procede a zig zag nel conduttore e ne segue le curve. Poi esce dall'altra estremità.

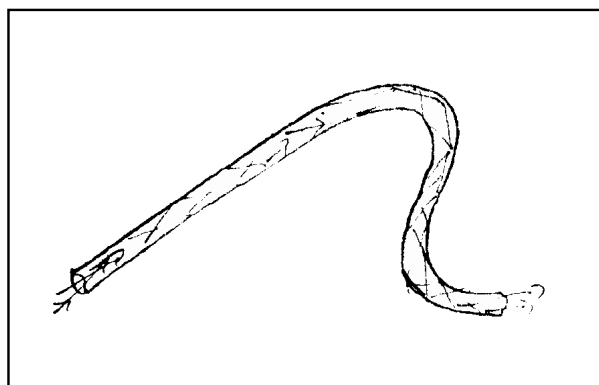


Fig. 21.50. Conduttore ottico.

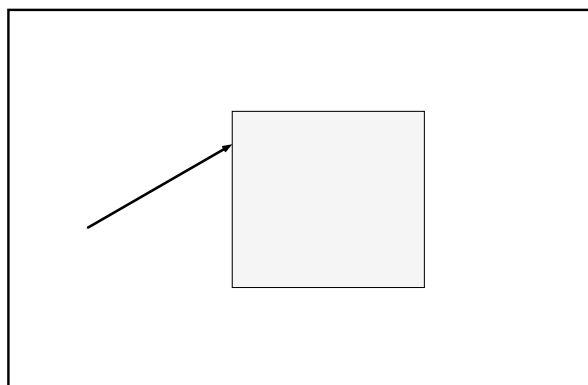


Fig. 21.51. Per l'esercizio 1

L'aspetto degno di nota della realizzazione tecnica dei conduttori ottici è il fatto che si sia riusciti a produrre dei tipi di vetro che permettono alla luce di percorrere diverse centinaia di metri senza grosse perdite dovute all'assorbimento. Non dimenticare che nel mare, a 300 m di profondità è buio pesto. La luce che entra in acqua non arriva fino a lì, nemmeno se il mare è molto pulito.

Esercizi

1. Come continua il raggio di luce in fig. 21.51? Ricorda che a volte una parte della luce viene riflessa e un'altra parte rifratta.
2. Un raggio di luce colpisce una sbarra cilindrica di vetro. Disegna il percorso del raggio di luce.

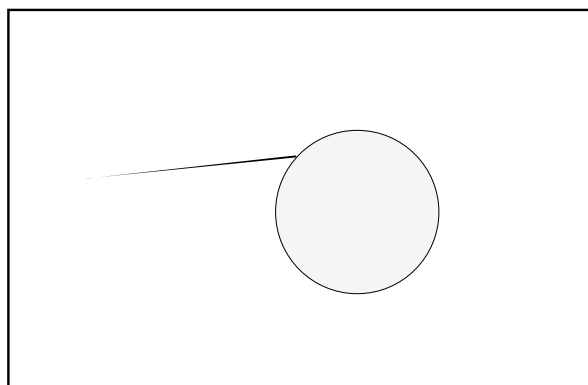


Fig. 21.52. Per l'esercizio 2

22. La formazione di immagini

22.1 Che cos'è un'immagine?

Abbiamo parlato della luce come portatore di energia. Con la luce l'energia del Sole arriva sulla Terra. Senza la luce solare sulla Terra farebbe così freddo da rendere impossibile la vita.

Abbiamo anche parlato della luce come portatore di dati. Sia in natura che nella tecnica, la luce viene usata come portatore di dati. Gli esseri umani e gli animali ricevono grandi quantità di dati grazie agli occhi. Hanno bisogno di questi dati per orientarsi nel mondo. Nella tecnica la luce viene usata come portatore di dati:

- nei conduttori ottici, per trasportare grandi quantità di dati da un posto all'altro;
- per leggere la musica da un CD;
- per leggere immagini e colonna sonora di un film su DVD.

Ma c'è un altro ambito molto vasto e importante della tecnica dove la luce funge da portatore di dati: l'ottica. L'obiettivo principale dell'ottica è la cosiddetta *formazione di immagini*. Prima di esaminare la formazione di immagini rispondiamo alla domanda "che cos'è un'immagine". Rispondere non è facile come probabilmente pensi.

Un'immagine è un oggetto, una cosa? Sembra di sì. Un quadro, una foto, un disegno ad esempio sono immagini. Queste immagini restano immagini

anche quando sono al buio e non le vediamo. La foto sul passaporto resta una foto anche quando ce l'abbiamo in tasca.

Ora pensiamo all'immagine che appare quando proiettiamo una diapositiva o un film sulla parete. Se spegniamo tutte le luci – compresa quella del proiettore – l'immagine scompare dalla parete. A nessuno verrebbe in mente di dire che l'immagine è rimasta sul muro.

Malgrado questa differenza, l'immagine proiettata ha in comune qualcosa di essenziale con l'immagine di un oggetto, come una fotografia stampata su carta – a condizione che la fotografia sia illuminata. E ha pure qualcosa in comune con l'immagine fuggevole sullo schermo di un televisore.

Vogliamo confrontare questi tre tipi di immagine: 1) la fotografia su carta; 2) la diapositiva proiettata 3) l'immagine televisiva.

Per semplificare il problema immaginiamo che "l'oggetto" rappresentato siano tre semplici punti luminosi su sfondo scuro. Inoltre i punti sono su un solo piano. Questo piano è visto di lato in fig. 22.1.

Cominciamo dalla luce che esce "dall'oggetto": da ognuno dei tre punti escono dei raggi in tutte le direzioni. Dagli altri punti non arriva nessuna luce.

Ora consideriamo la foto di questi punti luminosi, fig. 22.2. Dapprima l'immagine viene illuminata. La luce incidente è assorbita in tutti i punti esclusi

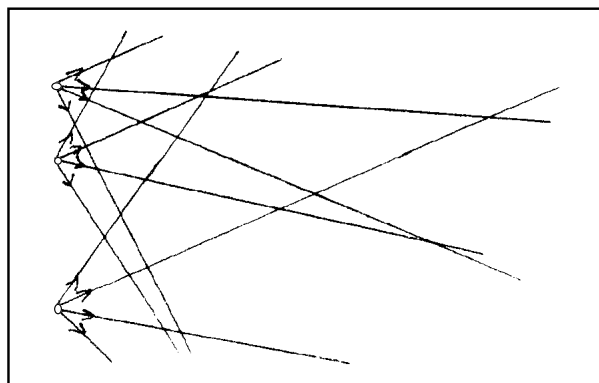


Fig. 22.1. Distribuzione della luce davanti a un oggetto composto da tre punti luminosi.

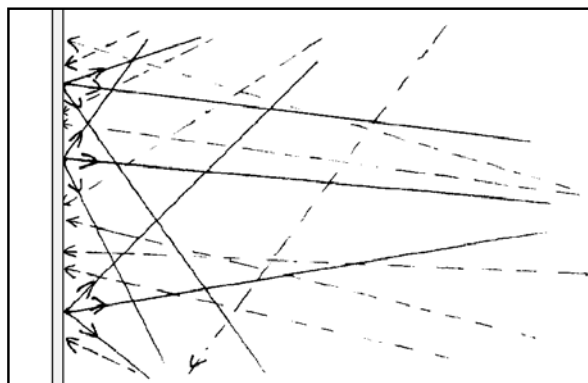


Fig. 22.2. Distribuzione della luce davanti a un'immagine su carta dell'oggetto di fig. 22.1. La luce incidente è rappresentata dalle linee tratteggiate.

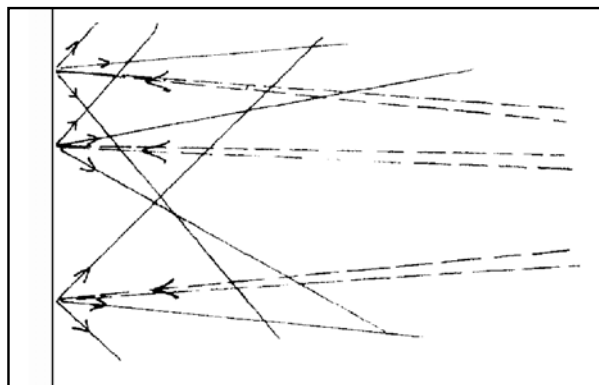


Fig. 22.3. Distribuzione della luce davanti a un'immagine proiettata dell'oggetto in fig. 22.1. La luce incidente è rappresentata delle linee tratteggiate.

quelli dove sull'immagine ci sono i punti luminosi: da lì viene respinta e quindi diffusa. La distribuzione della luce proveniente dalla fotografia è la stessa della luce emessa dai veri punti luminosi in fig. 22.1.

Capisci quanto sia importante che la luce venga respinta e contemporaneamente diffusa. Se venisse riflessa, sull'immagine vedremmo i punti solo da una direzione.

Passiamo all'immagine proiettata, fig. 22.3. Lo schermo non assorbe niente. Respinge tutta la luce che riceve e la diffonde. Ma la luce colpisce lo schermo solo in certe zone. Di conseguenza è solo da lì che viene respinta. La distribuzione della luce proveniente dallo schermo è ancora una volta uguale a quella dell'oggetto originale in fig. 22.1.

Possiamo descrivere così la differenza tra immagine stampata e immagine proiettata: nell'immagine stampata i dati sono immagazzinati nella carta. Restano lì anche quando l'immagine è al buio. Nella proiezione di una diapositiva o di un film, il contenitore di dati è la diapositiva rispettivamente la pellicola. Questi dati vengono letti durante la proiezione. (Nel caso della diapositiva, cioè un'immagine statica, si rileggono in continuazione gli stessi dati.)

Passiamo infine all'immagine sullo schermo di un televisore. A differenza degli altri casi lo schermo di

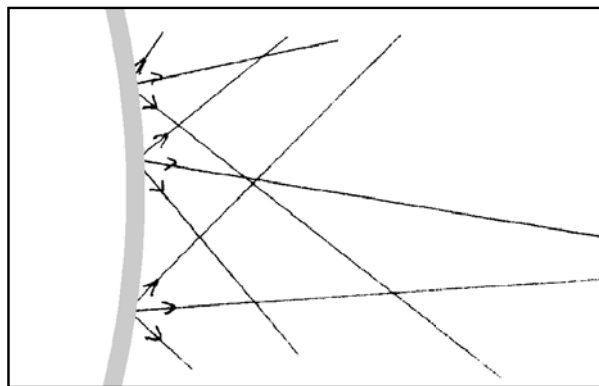


Fig. 22.4. Distribuzione della luce davanti a un'immagine televisiva dell'oggetto in fig. 22.1.

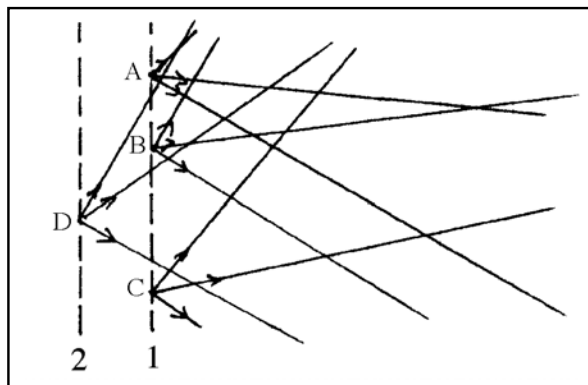


Fig. 22.5. I punti dell'oggetto non giacciono più sullo stesso piano.

un televisore non viene illuminato, è lui che emette luce. Da alcuni punti sullo schermo partono dei raggi di luce in tutte le direzioni, fig. 22.4. Ancora una volta la distribuzione della luce è uguale a quella dell'originale, fig. 22.1.

Le immagini hanno la caratteristica di essere piatte o "bidimensionali". Non hanno profondità.

Anche il nostro oggetto, i tre punti luminosi, era bidimensionale, non aveva profondità. Com'è la distribuzione della luce quando l'oggetto è esteso nella terza dimensione, cioè quando ha profondità?

Sicuramente sai come si disegna una casa a tre dimensioni su un foglio di carta a due dimensioni. Si schiaccia per così dire la terza dimensione, la si appiattisce.

Consideriamo nuovamente un modello molto semplice. La fig. 22.5 mostra la distribuzione della luce dell'originale, visto di lato. I punti luminosi non sono più sullo stesso piano. I punti A, B e C sono nel piano 1, il punto D è nel piano 2.

Esaminiamo un'immagine di questo oggetto, per esempio una foto, fig. 22.6. I punti sono stati schiacciati in uno stesso piano. Questa volta notiamo che la distribuzione della luce non è più la stessa dell'originale. La realtà tridimensionale è diversa dall'immagine bidimensionale.

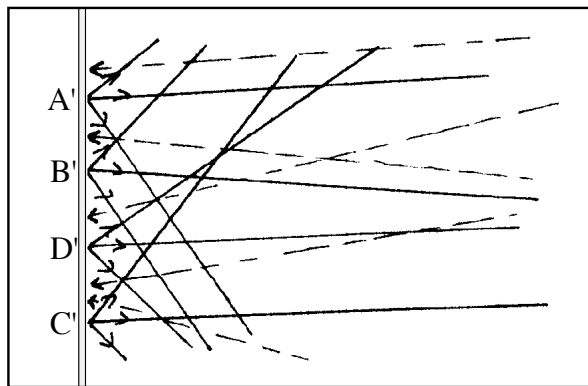


Fig. 22.6. Immagine dell'oggetto in fig. 22.5. I punti luminosi sono stati messi sullo stesso piano.

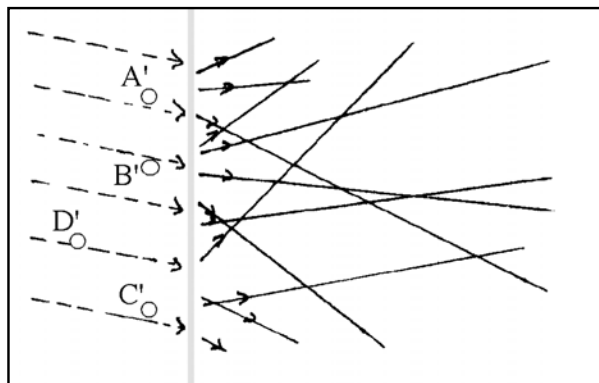


Fig. 22.7. La distribuzione della luce in un ologramma è uguale a quella dell'oggetto originale.

Anche se la distribuzione della luce è diversa da quella dell'oggetto reale, sull'immagine l'oggetto si riconosce facilmente. D'altra parte non ci sono dubbi che l'immagine sia solo un'immagine. Nessuno la confonderebbe con l'oggetto.

Ci sono immagini che riproducono correttamente anche la distribuzione di luce di un oggetto tridimensionale, fig. 22.7. Si chiamano ologrammi. Affinché la distribuzione di luce sia quella voluta devono essere illuminati con luce da una sola direzione. L'ideale è la luce laser.

Esercizi

1. Probabilmente ti sarà già capitato di notare quanto sia difficile riconoscere l'immagine di una diapositiva semplicemente tenendola in mano. Perché? Come si deve tenere la diapositiva per vederne bene l'immagine?
2. Non sarebbe meglio proiettare le diapositive su uno specchio invece che su uno schermo? Cosa vedremmo?

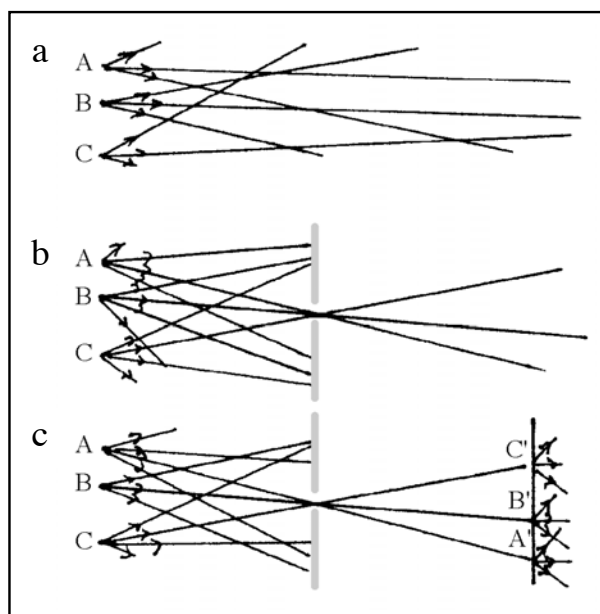


Fig. 22.8. Inseriamo un diaframma e una lastra di vetro smerigliato, sul percorso della luce proveniente da un oggetto

22.2 La camera oscura

È l'oggetto più semplice con il quale generare immagini: una scatola con un piccolo foro nel mezzo di una faccia. Sulla faccia opposta c'è un vetro smerigliato o una carta pergamena, cioè un materiale che lascia passare la luce e la diffonde. Sul vetro riconosciamo un'immagine degli oggetti che si trovano davanti al foro. Come si forma questa immagine?

Ancora una volta, per fare chiarezza immaginiamo che il "paesaggio" da riprodurre sia composto da tre soli punti luminosi. La fig. 22.8a li mostra visti di lato con i raggi di luce che emettono.

Dapprima inseriamo nel percorso di questi raggi una lastra forata, il diaframma, fig. 22.8b. Di tutti i fasci di luce solo tre molto sottili riescono a passare attraverso il foro.

Ora inseriamo una seconda lastra, di vetro smerigliato, sul percorso, fig. 22.8c. La lastra viene colpita in tre punti dalla luce proveniente dal foro. Questa luce viene diffusa dalla lastra. Quindi sulla lastra ci saranno tre punti luminosi A', B' e C'. A' è l'immagine di A, B' è l'immagine di B e C' è l'immagine di C. La distribuzione è la stessa della luce dei punti luminosi A, B e C, ma la sequenza dei punti è invertita. Possiamo dire che l'immagine è capovolta.

Nel nostro esempio i punti luminosi erano in uno stesso piano e la lastra di vetro smerigliato era parallela a questo piano. L'oggetto era piatto così come la lastra. Immaginiamo ora che l'oggetto abbia "profondità": uno dei punti è arretrato rispetto all'altro, fig. 22.9. Visto che la lastra di vetro smerigliato è piatta, lo sarà anche l'immagine. Ancora una volta il "paesaggio" è stato schiacciato.

Una variante particolarmente impressionante della camera oscura: oscuriamo un locale lasciando un foro in una delle finestre. Sulla parete bianca di fronte al foro vedremo un'immagine del paesaggio fuori da quella finestra, fig. 22.10.

Ancora una volta il foro fa in modo che la luce colpisca la parete provenendo da una sola direzione. Così

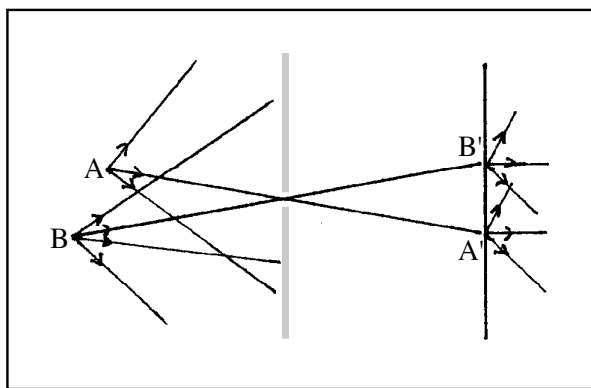


Fig. 22.9. I punti componenti l'oggetto non sono più sullo stesso piano.

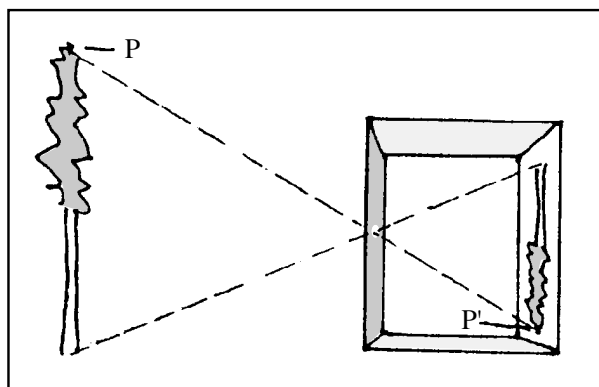


Fig. 22.10. Camera oscura. L'immagine viene osservata dall'interno della "camera oscura".

la luce del punto P colpisce la parete solo nel punto P'. La parete bianca serve a diffondere la luce.

Esercizi

1. Perché non si vede un'immagine quando in una camera oscura si sostituisce la lastra di vetro smerigliato con una lastra di vetro comune?
2. Cosa vediamo sulla parete di una camera oscura se la parete è uno specchio? Se l'oggetto è un unico punto luminoso, com'è la distribuzione della luce?

22.3 La relazione tra le dimensioni dell'oggetto e le dimensioni dell'immagine

L'immagine di un oggetto ripreso con una camera oscura è mostrata schematicamente in fig. 22.11. Chiamiamo A la grandezza dell'oggetto e B la grandezza dell'immagine. Chiamiamo a la distanza dell'oggetto dal diaframma e b la distanza tra immagine e diaframma. Tra le grandezze A , B , a e b c'è una semplice relazione:

$$\frac{A}{B} = \frac{a}{b}$$

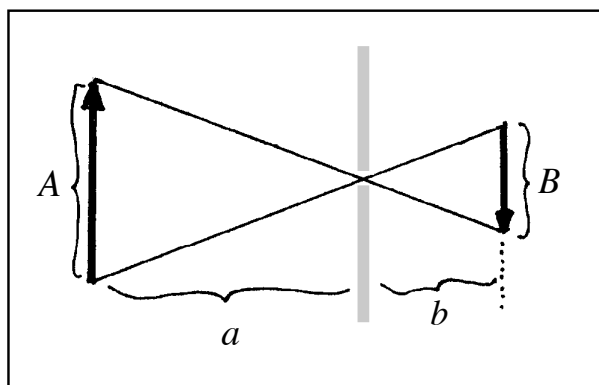


Fig. 22.11. A è la grandezza dell'oggetto, B la grandezza dell'immagine, a la distanza dell'oggetto e b la distanza dell'immagine.

Se conosci le proprietà geometriche delle rette puoi dedurre la relazione direttamente dalla fig. 22.11. Se non li conosci puoi provare a convincerti della loro validità.

In fig. 22.11 per esempio:

$$A = 30 \text{ mm}$$

$$B = 15 \text{ mm}$$

$$\text{Quindi } A/B = 2.$$

Inoltre

$$a = 40 \text{ mm}$$

$$b = 20 \text{ mm}$$

Quindi $a/b = 2$. La relazione $A/B = a/b$ è rispettata.

Esercizi

1. Riprendiamo il campanile di una chiesa con una camera oscura. Il campanile è a 100 m di distanza dalla camera. La distanza tra diaframma e schermo è 16 cm. L'immagine del campanile è alta 8 cm. Quanto è alto il campanile?
2. Il Duomo di Colonia è alto 157 m. Con una camera oscura lunga 20 cm riesci a ottenere un'immagine nella quale le torri del Duomo sono alte 2 cm. A che distanza ti trovi?
3. Un albero alto 8 m proietta un'immagine di 1 metro in una camera oscura. Quanto è alto un secondo albero che si trova accanto al primo e la cui immagine sia alta mezzo metro?

22.4 Il perfezionamento della camera oscura

Prepariamo una camera oscura. Sulla parete vediamo l'immagine della casa dirimpetto. Ma l'immagine è molto scura. "Rimediato subito", penserai, "allarghiamo il foro". Proviamo. Effettivamente l'immagine diventa più chiara. Ma succede anche una cosa spiacevole: l'immagine si sfoca. Il perché lo capisci dalla fig. 22.12.

Nell'immagine superiore il foro è piccolo. Le immagini dei due punti A e B sono due piccole macchie luminose A' e B'. Nell'immagine inferiore il foro è largo. Le "immagini" di A e B sono due macchie così grandi da sovrapporsi. Non possiamo più distinguere bene A' da B'. L'immagine dei punti A e B è *sfocata*.

In generale possiamo concludere:

Allargando il foro della camera l'immagine diventa più luminosa ma anche più sfocata.

Quindi non possiamo risolvere il nostro problema semplicemente allargando il foro. Dobbiamo avere un'idea migliore.

Rifacciamo un piccolo foro e otteniamo un'immagine nitida ma scura. A una certa distanza dal primo foro ne facciamo un altro. Cosa vediamo sulla pare-

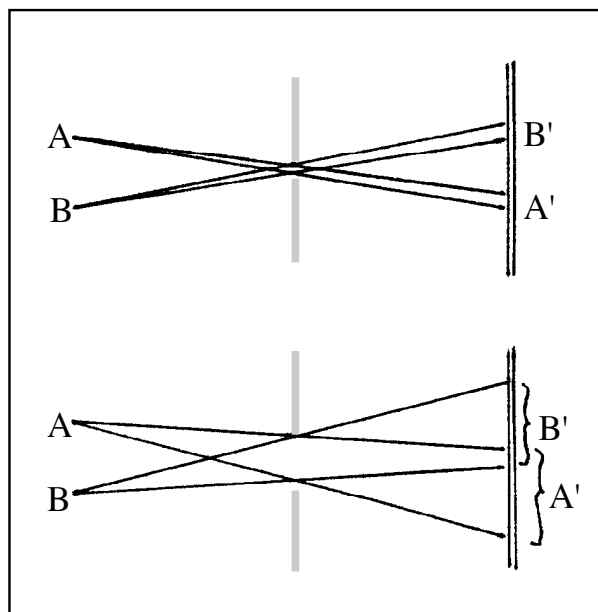


Fig. 22.12. Foro piccolo: le immagini sono separate. Foro grande: le immagini si sovrappongono.

te? Una seconda immagine, fig. 22.13a. Più precisamente: due volte la stessa immagine.

Siamo già più vicini alla soluzione del nostro problema. Dobbiamo solo spostare le due immagini in modo da sovrapporle. Dobbiamo deviare i raggi di luce che generano l'immagine. Ormai sai come fare: con i prismi, fig. 22.13b. Il risultato è un'immagine luminosa il doppio di quella che si ottiene con un solo foro. E l'immagine è nitida!

Questo è il vantaggio, ma c'è anche uno svantaggio. Con la nostra prima camera oscura – quella con un solo foro – ottenevamo sempre un'immagine nitida, indipendentemente dalla distanza tra lo schermo e il diaframma. La distanza si ripercuoteva solo sulla grandezza dell'immagine, fig. 22.14a.

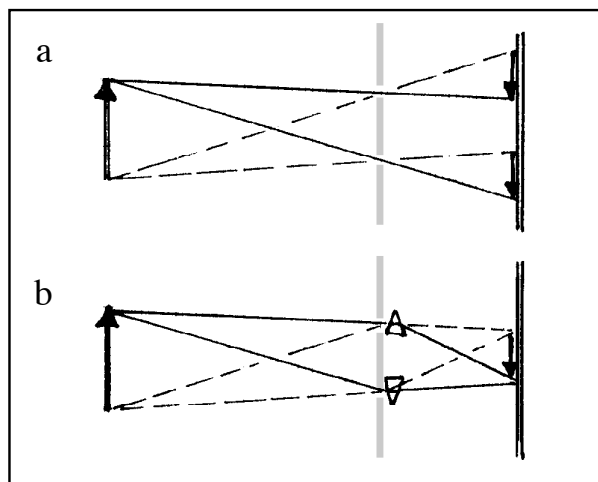


Fig. 22.13. (a) Una camera oscura con due fori genera due immagini. (b) Con l'aiuto di prismi le due immagini vengono sovrapposte.

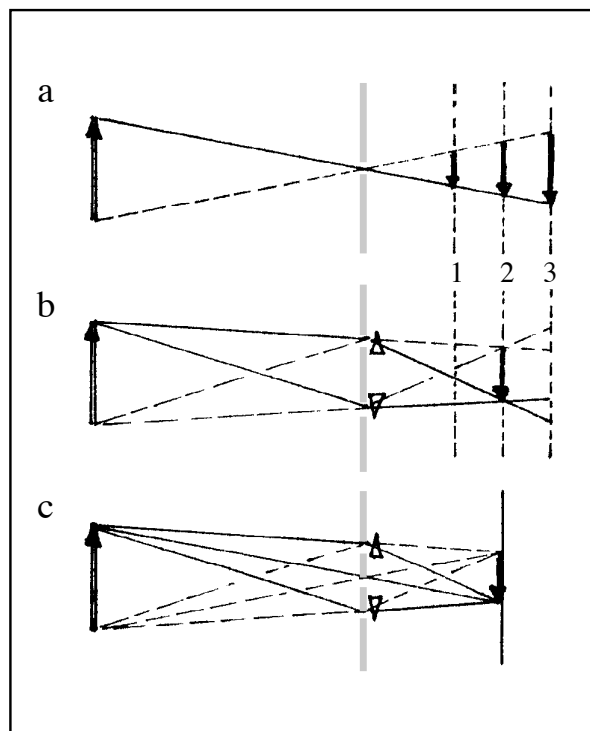


Fig. 22.14. (a) In una camera oscura singolo la distanza dello schermo influenza solo la grandezza dell'immagine. (b) In una camera oscura con due fori lo schermo deve essere a una certa distanza dal diaframma affinché l'immagine sia nitida. (c) Davanti al foro centrale non è necessario mettere un pri-

Nella camera a doppio foro non è più così. Le due immagini in fig. 22.13b si sovrappongono solo se lo schermo è a una determinata distanza dal diaframma. In fig. 22.14b sono indicate tre posizioni dello schermo. Solo quando lo schermo è in posizione 2 le immagini si sovrappongono. Se è più in avanti, in posizione 1, o più indietro, in posizione 3, le immagini non sono sovrapposte.

In fig. 22.14c è stato praticato un altro foro a metà tra i primi due. Non c'è bisogno di metterci un prisma, la sua immagine si sovrappone automaticamente alle altre due. Guardando i raggi di luce che attraversano il foro ci rendiamo conto che l'uguaglianza

$$\frac{A}{B} = \frac{a}{b}$$

continua a essere valida.

Esercizio

La luce si può deviare anche con gli specchi, non solo con i prismi. Che aspetto potrebbe avere una "camera oscura a doppio foro" che usa specchi invece di prismi? E se la camera avesse molti prismi? Che specchio otterremmo unendo tutti i singoli specchi?

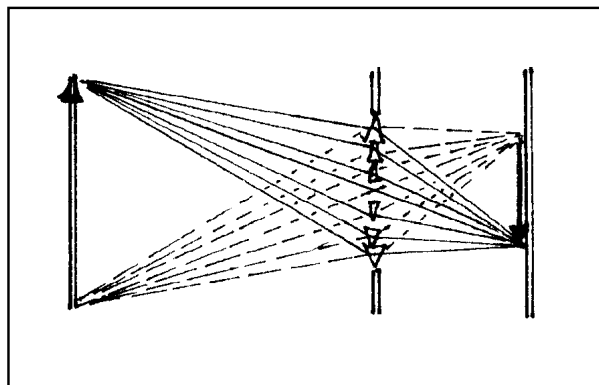


Fig. 22.15. Tutta la superficie dell'apertura è coperta di prismi.

22.5 La lente

Vogliamo un'immagine ancora più luminosa. Ormai è chiaro cosa fare. Facciamo altri fori nel diaframma e di fronte a ogni foro mettiamo un prisma adatto.

A questo punto potremmo anche fare un foro molto largo come già avevamo provato. Dobbiamo solo coprire tutta la superficie del foro con i prismi, fig. 22.15.

La luce che colpisce il centro del foro non deve nemmeno venir deviata. Man mano che si procede verso il bordo del foro, la deviazione necessaria aumenta. Quindi i prismi sono più piatti al centro. La fig. 22.16a mostra questi prismi visti di lato.

Invece di molti piccoli prismi si può usare un solo oggetto di vetro, una *lente*, fig. 22.16b. I prismi in fig. 22.16a sono solo più spessi di quelli in fig. 22.16a. Ma ciò che conta per la deviazione della luce è solo l'angolo relativo delle due facce opposte del prisma, quindi l'immagine si ottiene anche con un prisma spesso.

Una lente può avere una forma diversa da quella in fig. 22.16b ma avere lo stesso effetto, fig. 22.17. L'importante è che l'angolo tra le due facce del prisma aumenti dal centro verso il bordo.

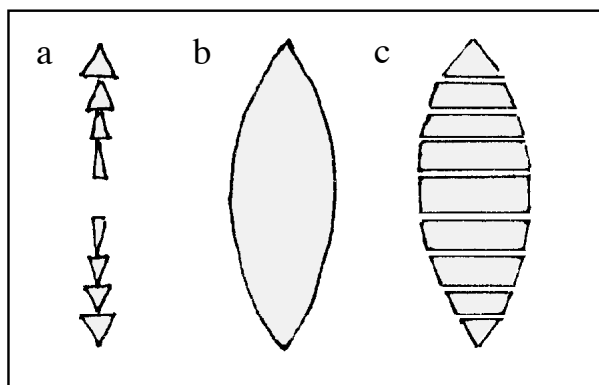


Fig. 22.16. Invece di molti prismi (a) si può usare un'unico corpo di vetro (b), che può essere visto come composto da una serie di prismi (c).

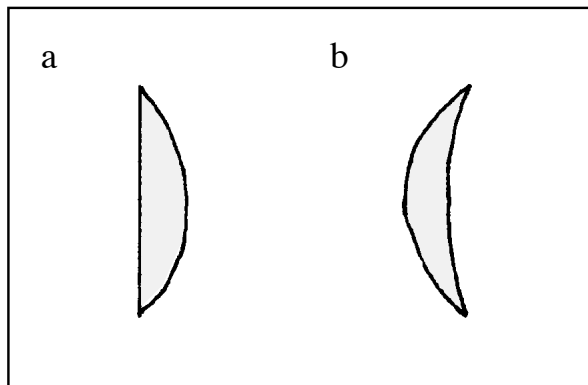


Fig. 22.17. Lenti di forme diverse.

La maggior parte delle lenti ha superfici sferiche. A volte una delle due superfici è piatta, fig. 22.17a.

La fig. 22.18 mostra il percorso dei raggi di luce che attraversano una lente.

Visto che in sostanza l'immagine ottica di una lente non è diversa da quella della camera oscura migliorata descritta nel paragrafo precedente, anche per lei vale:

$$\frac{A}{B} = \frac{a}{b}$$

22.6 La formazione di immagini attraverso le lenti

Nella nostra camera oscura migliorata avevamo constatato che l'immagine è nitida solo se lo schermo è alla giusta distanza dal diaframma. Lo stesso deve valere se usiamo una lente: l'immagine è nitida solo se lo schermo è alla distanza giusta. Verifichiamolo, fig. 22.19.

La retta perpendicolare che passa per il centro della lente si chiama *asse ottico*. Montiamo lo schermo perpendicolarmente all'asse ottico e lo muoviamo

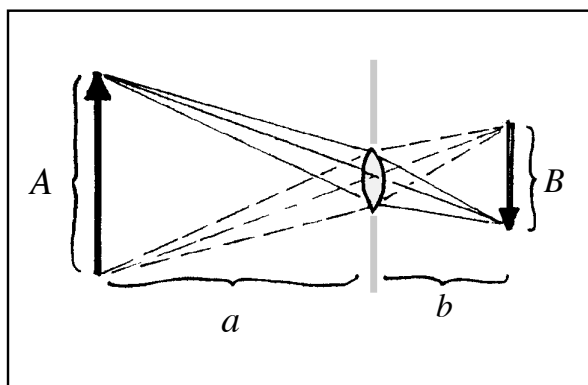


Fig. 22.18. Una lente genera un'immagine di un oggetto.

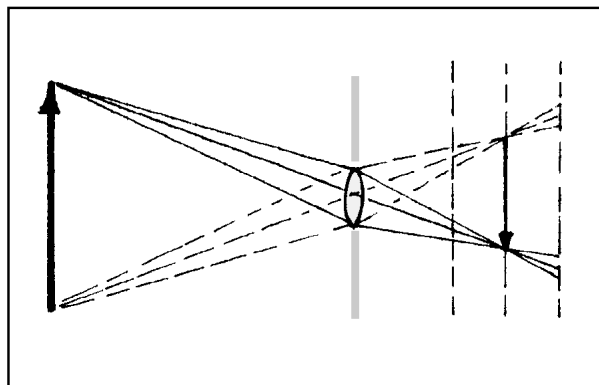


Fig. 22.19. L'immagine è nitida solo se lo schermo si trova a una certa distanza (che dipende dalla distanza dell'oggetto).

avanti e indietro parallelamente all'asse ottico. Constatiamo: l'immagine è nitida solo quando lo schermo si trova a una determinata distanza b dalla lente.

Si dice anche che l'immagine si trova a una distanza b dalla lente.

Ora lasciamo lo schermo nella posizione dove ci dava un'immagine (nitida) e muoviamo avanti e indietro l'oggetto, sempre parallelamente all'asse ottico, fig. 22.20. In altre parole modifichiamo la distanza a dell'oggetto. L'immagine si sfoca se avviciniamo l'oggetto, fig. 22.20b e si sfoca se lo allontaniamo, fig. 22.20c. Quindi l'immagine è nitida (quando lo schermo è fisso) solo se l'oggetto si trova a una determinata distanza dalla lente.

Un terzo esperimento: riprendiamo da quando l'oggetto e lo schermo erano alla distanza giusta per dare un'immagine nitida. Ora spostiamo l'oggetto verso la lente. L'immagine si sfoca. Per farla tornare nitida potremmo riportare l'oggetto nella posizione iniziale ma anche spostare lo schermo – allontanandolo dalla lente.

Spostiamo di nuovo l'oggetto – questa volta lo allontaniamo dalla lente. Per rimettere a fuoco l'immagine possiamo muovere lo schermo verso la lente.

Riassumiamo le nostre osservazioni:

A ogni distanza a tra lente e oggetto corrisponde una distanza b tra lente e immagine. Più grande è a , più piccolo è b .

Le distanze dell'oggetto e dell'immagine dalla lente vengono misurate lungo l'asse ottico.

Con una comune camera oscura (quella con un foro solo) non c'era una relazione del genere. L'oggetto e l'immagine potevano essere a distanze qualsiasi.

Vogliamo analizzare più a fondo la relazione tra a e b .

Mettiamo l'oggetto molto lontano dalla lente e cerchiamo la distanza della sua immagine. Poi allontaniamo ulteriormente l'oggetto. L'immagine rimpicciolisce ma resta nitida. Quindi la distanza dell'immagine non diminuisce più, fig. 22.21. Ha raggiunto il valore minimo che può assumere. Que-

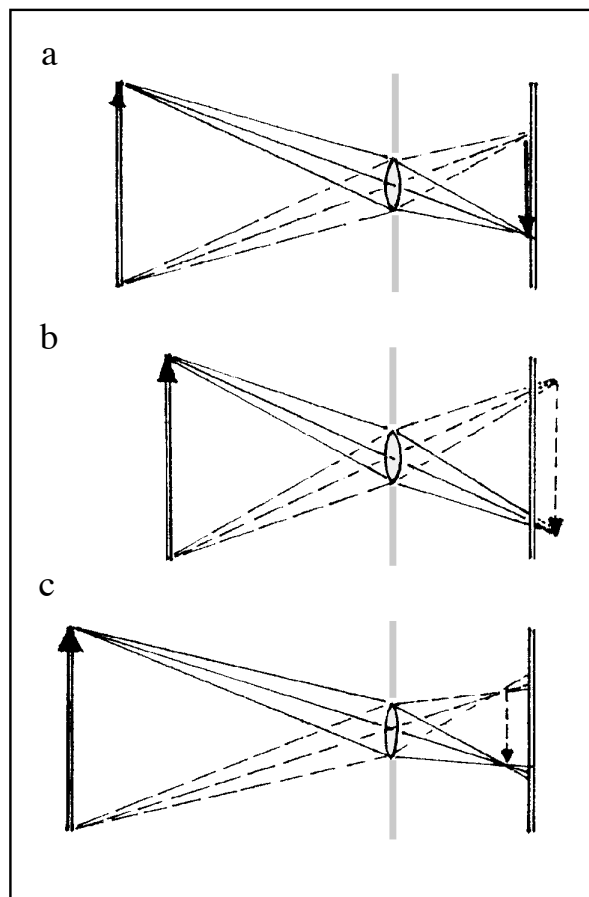


Fig. 22.20. (a) Situazione di partenza. (b) La distanza dell'oggetto è stata ridotta. (c) La distanza dell'oggetto è stata aumentata.

sto valore viene detto *lunghezza focale* f della lente. Il piano nel quale si forma l'immagine si chiama *piano focale*.

Per oggetti molto lontani dalla lente:

distanza dell'immagine $b =$ lunghezza focale f .

Cosa succede se spostiamo l'oggetto nell'altra direzione, cioè verso la lente? L'immagine si allontana dalla lente. Ma non possiamo avvicinarlo troppo. Quando la distanza dell'oggetto si avvicina alla lunghezza focale l'immagine si allontana sempre più in fretta. Quando a è minore di f non c'è più un'immagine nitida.

Si dice anche:

Quando $a = f$ l'immagine si trova "a distanza infinita".

In simboli:

Quando $a = f \Rightarrow b = \infty$.

In fig. 22.22 trovi due casi particolari.

a) L'oggetto è un unico punto luminoso a grande distanza dalla lente. La luce che colpisce la lente lo fa in ogni punto dalla stessa direzione. E la direzione dei raggi di luce è la stessa ovunque, per esempio nei punti P e Q. Quindi si tratta di *luce parallela*. L'im-

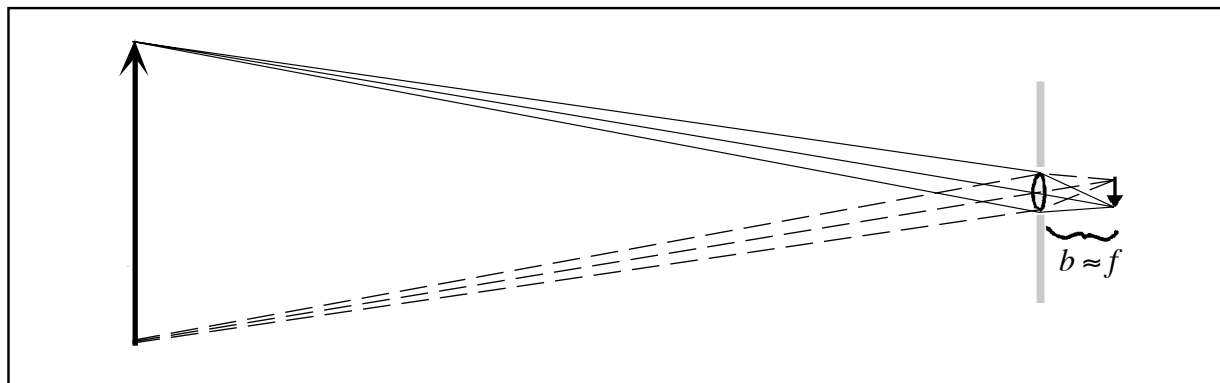


Fig. 22.21. La distanza dell'immagine è indipendente dalla distanza dell'oggetto quando a è molto grande. In quel caso la distanza dell'immagine equivale alla lunghezza focale.

immagine dell'oggetto è un punto nel piano focale di destra. In altre parole:

La luce parallela che colpisce una lente passa per un punto nel piano focale dietro la lente.

b) L'oggetto è un punto luminoso nel piano focale di sinistra. L'immagine è un punto "a distanza infinita". Di conseguenza la luce a destra della lente deve essere parallela.

La luce proveniente da una sorgente puntiforme nel piano focale della lente, dopo la lente è parallela.

Quindi è possibile concentrare luce parallela in un punto e rendere parallela la luce di una sorgente puntiforme, come con uno specchio parabolico.

Esercizio

Davanti a te c'è una lente la cui lunghezza focale ti è sconosciuta. Inoltre c'è una candela e dei fiammiferi. Come puoi determinare la lunghezza focale della lente? Descrivi due procedimenti.

22.7 Lunghezza focale e potere diottrico

La lunghezza focale è una grandezza che caratterizza ogni lente. Esistono lenti con lunghezze focali molto diverse. Come si può determinare la lunghezza focale di una lente? Formiamo l'immagine di un oggetto posto molto lontano dalla lente, come in fig. 22.21. Misuriamo la distanza dell'immagine e otteniamo contemporaneamente la lunghezza focale, visto che in questa situazione $b = f$. Determiniamo con questo metodo la lunghezza focale di alcune lenti e constatiamo:

Le lenti con la superficie più incurvata hanno la lunghezza focale minore.

La lunghezza focale è influenzata dalla curvatura di entrambe le superfici. Così le tre lenti in fig. 22.23 hanno la stessa lunghezza focale. Come si nota una delle due superfici può anche essere incurvata verso l'interno, a condizione che l'altra lo sia ancora di più verso l'esterno.

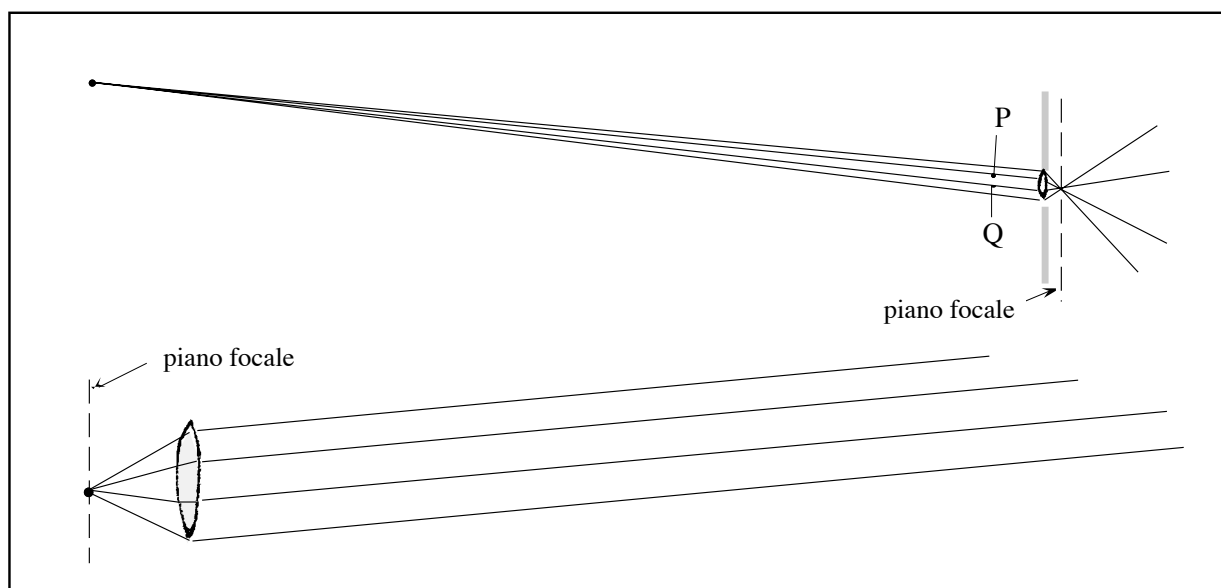


Fig. 22.22. (a) L'oggetto è un unico punto luminoso molto lontano dalla lente. La luce dietro la lente passa da un punto nel piano focale. (b) L'oggetto è un punto luminoso nel piano focale di sinistra. La luce alla destra della lente è parallela.

Spesso le lenti non vengono caratterizzate dalla loro lunghezza focale ma dal suo inverso, il *potere diottrico* D :

$$D = \frac{1}{f}$$

Un potere diottrico maggiore significa che i raggi di luce che colpiscono il bordo della lente saranno deviati di più.

L'unità di misura del potere diottrico è 1/m. Questa unità si dice anche diottria, abbreviato dt. Quindi:

$$1 \text{ dt} = 1/\text{m}$$

Una lastra piana che alla luce non fa (quasi) niente ha un potere diottrico di 0 dt.

22.8 Le lenti composte

Montiamo una lente L_1 con la lunghezza focale f_1 e uno schermo, in modo che l'immagine di un oggetto lontano sia riprodotta sullo schermo, fig. 22.24a. Visto che l'oggetto è così lontano la distanza dell'immagine è uguale alla distanza focale della lente.

Sostituiamo la lente con un'altra lente L_2 di lunghezza focale f_2 . La nuova immagine si trova a una distanza f_2 dalla lente, fig. 22.24b.

Ora montiamo entrambe le lenti, mettendole il più possibile l'una vicina all'altra. E cerchiamo nuovamente il punto dove appare un'immagine (nitida). Constatiamo che la lunghezza focale è inferiore a f_1 e a f_2 , fig. 22.24c. (Misuriamo la lunghezza focale dal punto fra le due lenti.)

La nuova distanza alla quale si trova l'immagine è la lunghezza focale f del *sistema di lenti* composto da L_1 e L_2 . Quindi

$$f < f_1 \text{ e } f < f_2.$$

Oppure, espresso in diottrie: il potere diottrico D del sistema di lenti è maggiore del potere diottrico

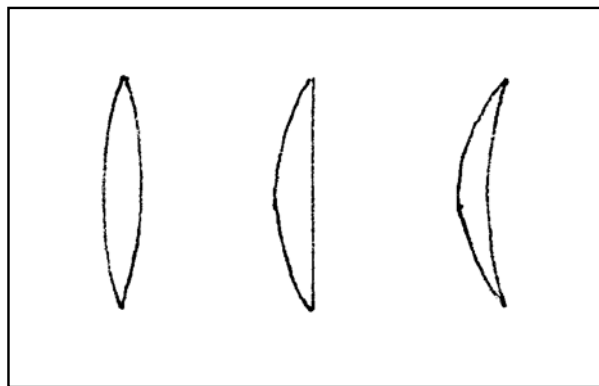


Fig. 22.23. Tutte e tre le lenti hanno la stessa lunghezza focale.

D_1 della lente L_1 e maggiore del potere diottrico D_2 della lente L_2 . Se misuriamo le tre lunghezze focali f, f_1 e f_2 e calcoliamo i poteri diottrici, constatiamo che:

$$D = D_1 + D_2$$

Il potere diottrico di un sistema di lenti è uguale alla somma dei poteri diottrici delle singole lenti.

La lente L_1 a sinistra in fig. 22.25 in verità non è una lente: è più spessa ai bordi che al centro. Una delle sue superfici è concava, l'altra è piatta. Mettiamo questa lente prima di una lente "vera" L_2 . La superficie convessa della seconda lente si adatta perfettamente a quella concava della prima.

Complessivamente abbiamo una lastra a superfici parallele, cioè un sistema di lenti con il potere diottrico di 0 dt. Vorremmo che l'equazione $D = D_1 + D_2$ fosse valida anche in questo caso. Affinché la somma sia 0 dt, D_1 deve essere negativo. Se la lente di destra ha 4 diottrie, quella di sinistra deve avere meno quattro diottrie:

$$D_1 = 4 \text{ dt} \quad D_2 = -4 \text{ dt}$$

Quindi le lenti sottili al centro e spesse ai bordi hanno un potere diottrico negativo.

Se davanti a una lente con

$$D_1 = 5 \text{ dt}$$

mettiamo un'altra lente con

$$D_2 = -1,5 \text{ dt},$$

otteniamo un sistema di lenti con

$$D = 3,5 \text{ dt}.$$

Esercizi

1. Un sistema di lenti è composto da una lente con un potere diottrico di 3 dt e un'altra con un potere diottrico di -4 dt. Qual è il potere diottrico del sistema?
2. Due lenti con una lunghezza focale di 40 cm vengono messe una dietro l'altra. Qual è il potere diottrico del sistema di lenti? Che lunghezza focale ha?
3. Tre lenti vengono montate una dopo l'altra. La prima ha una lunghezza focale di 20 cm e la seconda ha una lunghezza focale di 50 cm. La terza ha un potere diottrico di meno due diottrie. Qual è il potere diottrico del sistema di lenti?
4. Hai in mano una lente con superfici concave e vuoi determinarne il potere diottrico. Sai di non poterlo fare con lo stesso metodo usato per una lente normale. Come fai? Che apparecchi usi?

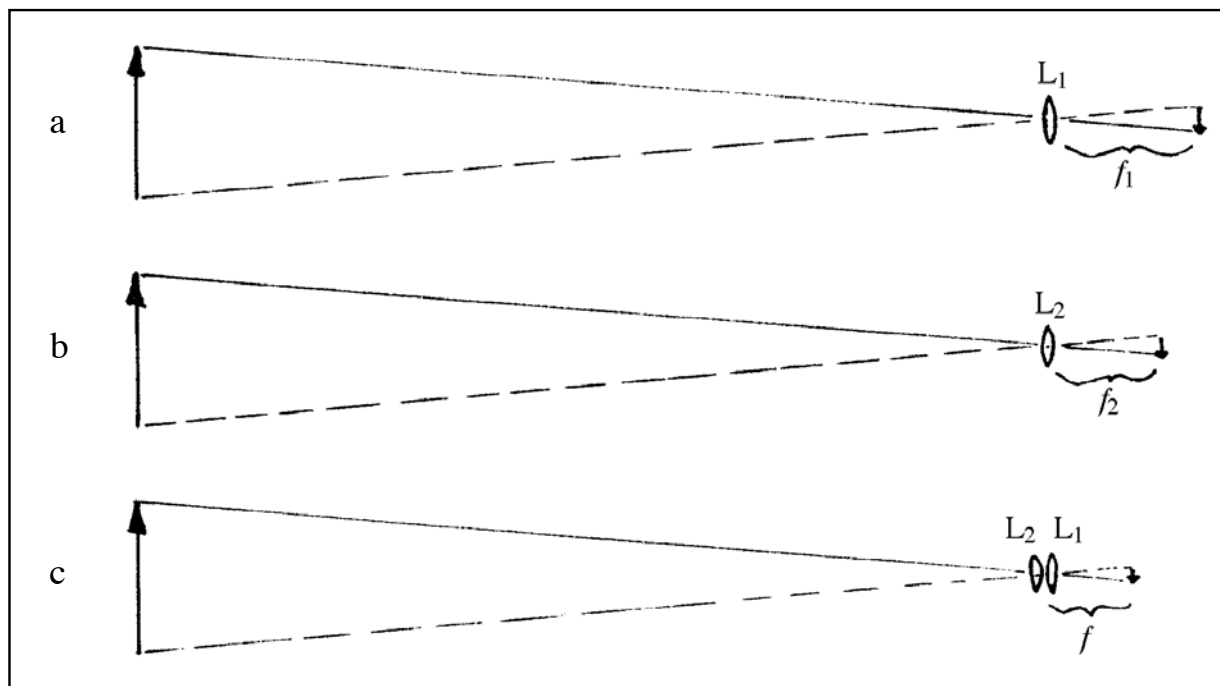


Fig. 22.24. La lunghezza focale del sistema di lenti (c) è minore di quella della lente L_1 (a) e di quella della lente L_2 (b).

22.9 La profondità di campo

Finora ci siamo occupati solo della formazione di immagini di oggetti piatti, di oggetti descrivibili con un solo piano. Se l'oggetto è esteso in direzione dell'asse ottico, se ha profondità, il tutto si complica.

Consideriamo l'esempio della formazione dell'immagine di due punti luminosi A e B che si trovano a distanze diverse a_A e a_B dalla lente. Visto che a_A e a_B sono diverse, anche le distanze delle immagini b_A e b_B lo sono.

Se mettiamo lo schermo a una distanza b_A dalla lente, fig. 22.26a, l'immagine di A sarà nitida. La luce proveniente da B non genera un punto luminoso ma una macchia più grande. L'immagine di B non è nitida.

Se invece mettiamo lo schermo alla distanza b_B , fig. 22.26b, l'immagine di B è nitida e quella di A sfocata.

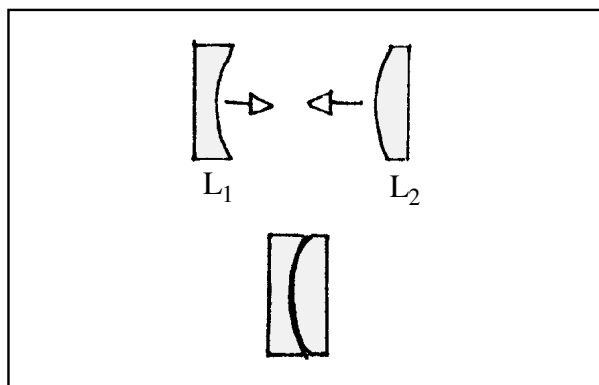


Fig. 22.25. La lente di sinistra ha un potere diottrico negativo, quella di destra un potere diottrico positivo.

Quindi: se un'immagine è nitida l'altra è sfocata.

Facciamo un compromesso e mettiamo lo schermo a metà tra le distanze b_A e b_B , fig. 22.26c. Ora entrambe le immagini sono sfocate, ma quella di A lo è meno che in fig. 22.26b e quella di B è meno sfocata che in fig. 22.26a.

Interveniamo un'ultima volta: inseriamo un diaframma in modo tale che solo il centro della lente sia illuminato, fig. 22.26d. È come se avessimo sostituito la lente con una di diametro inferiore (ma con la stessa lunghezza focale).

Cosa succede? L'immagine non diventa solo più scura, diventa anche più nitida. Capiamo il perché osservando la fig. 22.26d: le macchie che otteniamo come "immagini" di A e B sono diventate più piccole. Se restringiamo ancora il foro, a un certo punto otterremo una nitidezza soddisfacente.

L'immagine dell'oggetto è sempre nitida per un certo tratto nel senso della profondità. Più piccola è la lente, maggiore sarà questo tratto, detto *profondità di campo*.

Quindi:

Le lenti più piccole hanno la profondità di campo maggiore.

Ma una lente più piccola significa anche meno luce, un'immagine più scura. Quindi:

Una grande profondità di campo e una grande luminosità dell'immagine si escludono a vicenda.

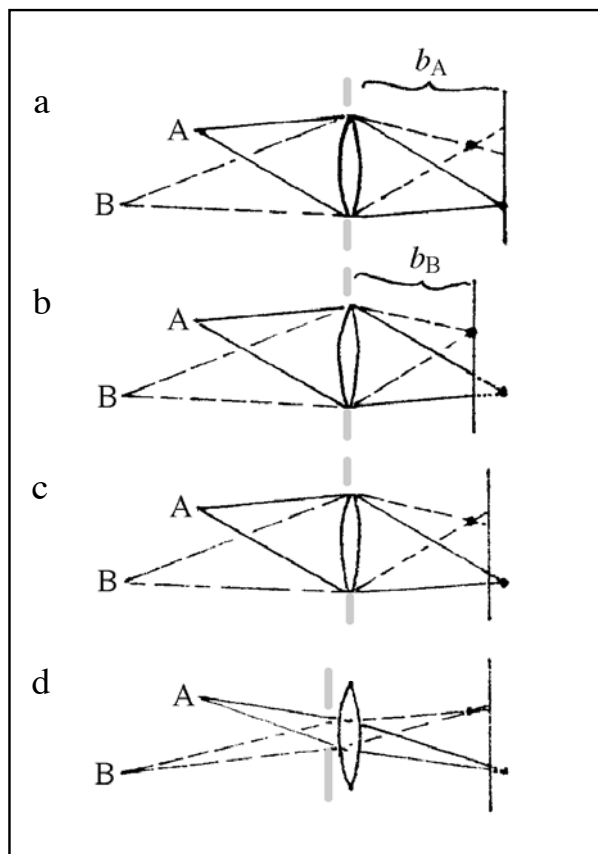


Fig. 22.26. (a) L'immagine di A è nitida, quella di B è sfocata. (b) L'immagine di B è nitida, quella di A è sfocata. (c) Compromesso: entrambe le immagini sono un po' sfocate. (d) Il diametro della lente è stato ridotto. Entambe le immagini sono a fuoco.

22.10 Gli obiettivi

Ora sai l'essenziale sulla formazione di immagini con le lenti. Naturalmente non hai imparato tutto quello che c'è da sapere. Per esempio, avrai già notato come una macchina fotografica, una videocamera, un proiettore per diapositive o una lavagna luminosa, non generino immagini con una sola lente, ma con molte: con un *obiettivo*.

Ma, stando a quanto detto finora, 2 o 3 o più lenti dovrebbero essere equivalenti a una sola. Si dovrebbe poter sostituire l'obiettivo con una sola lente. Sappiamo persino come calcolare il potere diottrico di quella lente a partire dai poteri diottrici delle singole lenti componenti l'obiettivo.

Malgrado ciò usare una sola lente o un obiettivo non è la stessa cosa. Le cose che abbiamo imparato sulla formazione di immagini con le lenti sono vere solo in parte. Guardando meglio noteremo che una lente non riproduce mai con assoluta esattezza un punto luminoso. Inoltre l'immagine di un piano perpendicolare all'asse ottico non è piatta ma leggermente incurvata. In realtà l'immagine di una retta è una linea leggermente curva. Un punto bianco viene riprodotto come una serie di piccoli anelli colorati. E ci sono ancora altre *aberrazioni* di questo genere.

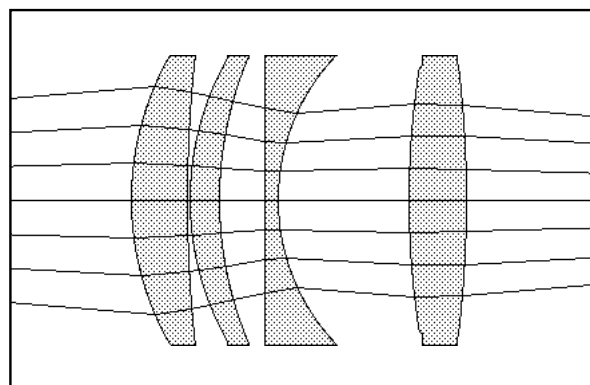


Fig. 22.27. Obiettivo di una macchina fotografica composto da quattro lenti.

Possiamo ridurre le imprecisioni dell'immagine usando più lenti invece di una sola. Il calcolo di questi obiettivi è però una faccenda complicata.

La maggior parte delle macchine fotografiche ha obiettivi con almeno 4 lenti. La fig. 22.27 mostra la sezione di un obiettivo. Gli obiettivi dei microscopi hanno spesso più di 10 lenti. Nella produzione delle varie lenti di un obiettivo vengono usati differenti tipi di vetro.

22.11 La macchina fotografica

Essenzialmente abbiamo già detto molto delle macchine fotografiche. La fig. 22.28 ne mostra la struttura. È simile alla camera oscura a un foro.

L'obiettivo genera sulla pellicola l'immagine delle cose poste di fronte alla macchina fotografica.

Affinché l'immagine dell'"oggetto" che vogliamo fotografare sia nitida, la lunghezza focale deve avere il giusto valore. Di solito è grazie a un anello attorno all'obiettivo che si procede alla "messa a fuoco", cioè alla regolazione della lunghezza focale. Ruotando l'anello, l'obiettivo viene avvicinato al piano della pellicola. La scala sull'anello indica la distanza dell'oggetto corrispondente alla lunghezza focale scelta. Di conseguenza si dice che con l'anello si regola la distanza (dell'oggetto).

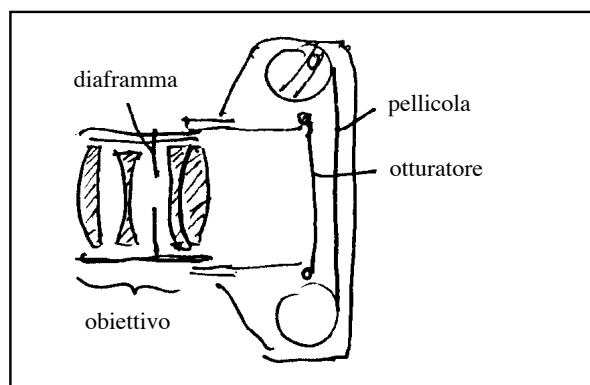


Fig. 22.28. Macchina fotografica.

Normalmente il percorso della luce è interrotto dall'*otturatore*. Per fare una foto azioniamo lo *scatto*. L'otturatore si apre per breve tempo. La maggior parte delle macchine fotografiche permette di regolare il tempo di esposizione. Più breve lo si sceglie, meno probabilità ci sono di fare una foto moscia. Per oggetti che non si muovono troppo rapidamente $1/60$ di secondo dovrebbe bastare.

Oltre al tempo di esposizione e alla distanza c'è un'altra regolazione da fare. Nell'obiettivo c'è un'apertura circolare il cui diametro può essere modificato. Quando il diaframma è più aperto nell'obiettivo entra più luce, ma la profondità di campo è ridotta.

I numeri indicati sul regolatore del diaframma non sono il suo diametro ma il rapporto:

$$\frac{\text{lunghezza focale}}{\text{diametro del diaframma}} = \frac{f}{d}$$

Esempio: un obiettivo con una lunghezza focale di 50 mm ha un diaframma con apertura massima di 18 mm. Il numero corrispondente indicato sulla scala è $50/18 \approx 2,8$.

Ciò significa: i valori più grandi corrispondono a una minore apertura del diaframma.

In molte macchine fotografiche le tre regolazioni descritte – distanza, tempo di esposizione e diaframma – vengono effettuate automaticamente. Per poterlo fare la macchina fotografica deve essere equipaggiata con un esposimetro, per misurare la luminosità, e un misuratore di distanze.

La pellicola subisce modifiche chimiche causate dalla luce che la colpisce. Ma queste modifiche non si vedono subito. Nella pellicola deve avvenire un processo chimico che produce un'immagine visibile: deve essere *sviluppata* grazie al liquido di sviluppo.

A questo punto l'immagine sarebbe visibile. Ma non la possiamo guardare, perché per farlo dovremmo illuminare la pellicola e la luce causerebbe nuove modifiche chimiche. Affinché ciò non accada, dopo lo sviluppo la pellicola viene immersa in un altro bagno e *fissata*. Ora possiamo metterla alla luce e guardarla.

Ciò che vediamo corrisponde a quanto fotografato, ma il bianco e il nero, il chiaro e lo scuro, sono invertiti. E neanche i colori sono quelli giusti. Quello che abbiamo ottenuto è un *negativo*, fig. 22.29a.

A partire dal negativo si ottiene una foto su carta con un procedimento simile al fotografare. La foto stampata è il negativo del negativo e quindi i valori di luminosità e i colori sono di nuovo come nell'originale, è un *positivo*, fig. 22.29b.

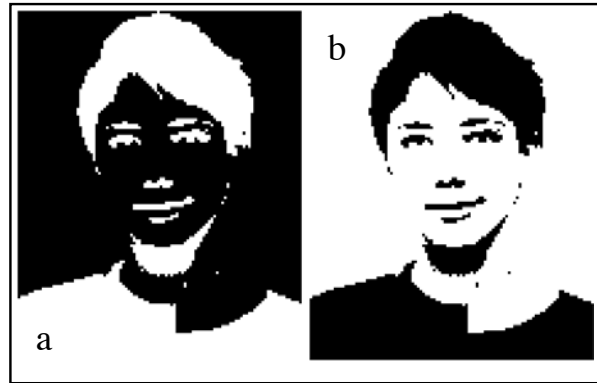


Fig. 22.29. Negativo (a) e positivo (b).

In un film per diapositive il processo di sviluppo è più complesso. Il risultato è una pellicola già in positivo.

Se comperiamo una macchina fotografica, tra le altre cose dobbiamo decidere la lunghezza focale dell'obiettivo.

Visto che gli oggetti fotografati sono sempre molto lontani dall'obiettivo, la distanza dell'immagine non è molto diversa dalla lunghezza focale:

$$b \approx f$$

La fig. 22.30 mostra un oggetto ripreso da tre obiettivi diversi a tre distanze diverse. L'obiettivo in alto ha la lunghezza focale maggiore, quello in basso la minore. Notiamo che l'immagine dell'oggetto è più grande quando si usa l'obiettivo con la lunghezza focale maggiore (il potere diottrico minore).

Il fatto che l'oggetto produca sulla pellicola un'immagine più grande significa anche che l'angolo "visto" dalla macchina fotografica è ridotto. Quindi con un obiettivo che ha una grande lunghezza focale si ha una visuale ristretta e con un obiettivo dalla lunghezza focale più corta una visuale più ampia.

Gli obiettivi con una grande lunghezza focale "avvicinano gli oggetti". Si chiamano *teleobiettivi*. Gli obiettivi con una lunghezza focale corta riprendono un angolo molto ampio. Si chiamano *grandangolari*. Tra di loro ci sono gli *obiettivi standard*.

Riassumiamo:

Più è grande la lunghezza focale, più lo sarà l'immagine dell'oggetto.

Su molte macchine fotografiche si può cambiare obiettivo, cioè montare degli obiettivi con lunghezze focali diverse. Lo zoom è ancora più pratico: un solo obiettivo con la lunghezza focale regolabile.

Esercizi

1. In quali condizioni il tempo di esposizione di una macchina fotografica deve essere breve e in quali più lungo?
2. Quali sono i vantaggi ad aprire molto il diaframma e quali quelli a tenerlo più chiuso?

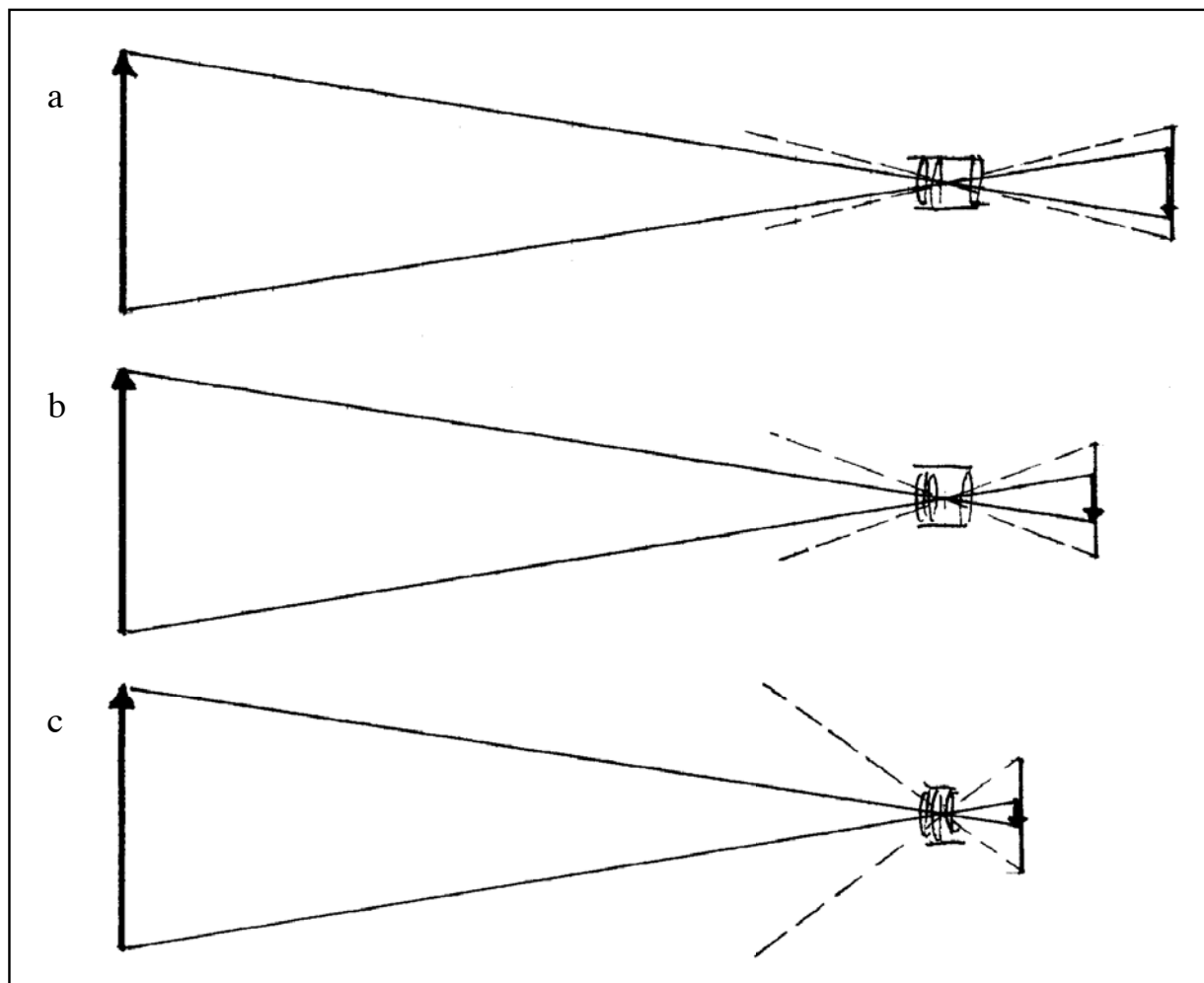


Fig. 22.30. Lo stesso oggetto ripreso con tre diversi obiettivi. (a) Teleobiettivo; (b) obiettivo normale; (c) grandangolare.

3. Quando si mette a fuoco si deve tener conto anche della regolazione del diaframma. Perché?

4. Per stampare una fotografia su carta a partire da un negativo, ci si serve di un apparecchio di ingrandimento. Come deve essere fatto un apparecchio del genere? Fai uno schizzo.

5. In un locale non molto grande c'è una festa di compleanno. Vuoi fare una foto che ritragga tutti gli ospiti. Che obiettivo usi? Perché?

6. Vuoi fotografare la tua amica con le montagne sullo sfondo. Guardando nel mirino ti accorgi che le montagne si vedono appena. Vuoi che facciano più impressione, quindi devi cambiare obiettivo. Di quale obiettivo hai bisogno? Perché?

7. Una macchina fotografica per piccolo formato ha una pellicola di 24 mm per 36 mm. L'obiettivo standard ha una lunghezza focale di 50 mm. L'obiettivo standard di una macchina fotografica compatta (pellicola di 13 mm per 17 mm) ha una lunghezza focale di 24 mm. Perché le lunghezze focali sono diverse?

8. Un palazzo alto 10 m deve essere ripreso da una distanza di 200 m, una volta con un obiettivo normale ($f = 50$ mm) e una volta con un teleobiettivo ($f = 180$ mm). Qual è l'altezza del palazzo sul negativo?

22.12 L'occhio

L'occhio è simile a una macchina fotografica, fig. 22.31. La luce entra nel bulbo oculare attraverso la pupilla. L'immagine si forma sulla retina. Dietro l'iride (il diaframma che permette di regolare l'apertura della pupilla) c'è il cristallino. Nello spazio tra la cornea e il cristallino e tra il cristallino e la retina c'è sostanzialmente solo acqua. La densità ottica del materiale di cui è fatto il cristallino è leggermente maggiore di quella dell'acqua. La luce viene rifratta principalmente entrando nella cornea (potere diottrico circa 43 dt). Il cristallino contribuisce poco alla formazione dell'immagine. La sua funzione principale è la "messa a fuoco". Tendendo i muscoli che lo trattengono, si può aumentare il potere diottrico del cristallino (da 15 dt a 27 dt).

Quando i muscoli sono distesi gli oggetti lontani sono impressi nitidamente sulla retina. Con i muscoli tesi sono gli oggetti vicini a essere nitidi. La distanza più piccola alla quale si può mettere a fuoco è circa 10 cm. Puoi provare da solo.

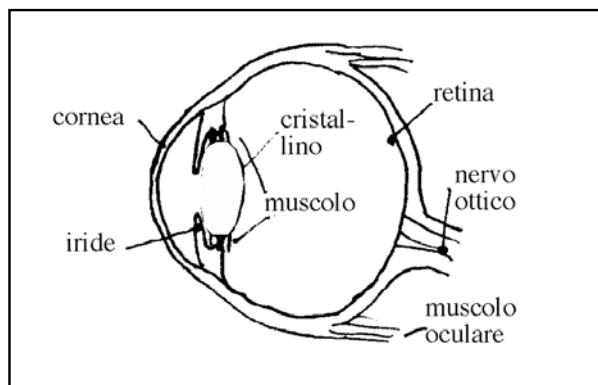


Fig. 22.31. L'occhio umano.

Il vero e proprio ricevitore di dati è la retina: il ricevitore per i dati che giungono all'occhio con il portatore luce. La retina è composta da un gran numero di piccoli ricevitori, dai quali i dati raggiungono il cervello attraverso il nervo ottico.

22.13 Occhiali e lenti di ingrandimento

Gli occhiali

Quando i muscoli del cristallino sono rilassati, un oggetto molto lontano dovrebbe proiettare un'immagine nitida sulla retina.

I miopi hanno il bulbo oculare troppo lungo, l'immagine di un oggetto lontano si forma davanti alla retina. In altre parole: l'immagine sulla retina è sfocata, fig. 22.32a. Per ottenere un'immagine nitida dovremmo diminuire il potere diottrico del cristallino. Tendendo i muscoli non ci si riesce – anzi, il potere diottrico aumenterebbe e l'immagine sarebbe ancora più sfocata. Ciò che serve è un paio di occhiali con lenti che abbiano un potere diottrico negativo, fig. 22.32b.

Nei presbiti il bulbo oculare è troppo corto, fig. 22.32c. La conseguenza: innanzitutto i muscoli devono essere tesi per ottenere un'immagine nitida di un oggetto lontano. Inoltre la distanza minima alla quale si riesce a mettere a fuoco è maggiore del normale. La presbiopia si corregge portando occhiali con potere diottrico positivo, fig. 22.32d.

Invecchiando il cristallino perde la sua elasticità; tendendo i muscoli il suo potere diottrico non aumenta più come in una persona giovane. La persona non riesce più a vedere con nitidezza gli oggetti vicini. Anche in questo caso servono occhiali con potere diottrico positivo. Però gli occhiali servono solo mentre la persona in questione guarda oggetti vicini, per esempio se legge. Per guardare oggetti lontani deve togliersi gli occhiali, oppure... vedi fig. 22.33.

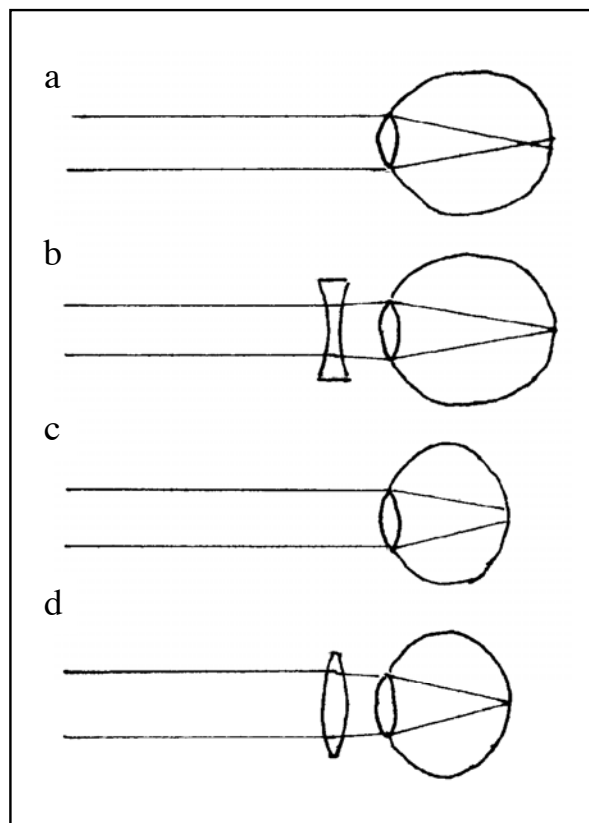


Fig. 22.32. (a) I miopi hanno il bulbo oculare troppo lungo; (b) Correzione con una lente di potere diottrico negativo; (c) I presbiti hanno il bulbo oculare troppo corto; (d) Correzione con una lente di potere diottrico positivo.

La lente di ingrandimento

Per vedere meglio un oggetto lo avviciniamo il più possibile ai nostri occhi – tanto vicino da riuscire appena a vederlo nitidamente. Per vederlo ancora più grande dovremmo avvicinarlo ancora di più. Ma in quel caso l'immagine sarebbe sfocata in quanto il potere diottrico del cristallino non è grande abbastanza. La lente di ingrandimento è proprio quello che ci vuole. Una lente di ingrandimento non è altro che una lente con potere diottrico positivo. Il potere diottrico dell'occhio e della lente combinati, è maggiore di quello dell'occhio da solo. Quindi una lente di ingrandimento ha la stessa funzione degli occhiali per presbiti.



Fig. 22.33. Di quale difetto della vista soffre questa persona?

Esercizi

1. Come fai a capire se un paio di occhiali appartiene a una persona miope o presbite?
2. Prova con occhiali tuoi o prestati da qualcuno a riprodurre sulla parete l'immagine di una lampadina accesa. Può darsi che non ti riesca. Da cosa potrebbe dipendere?
3. Una lente di ingrandimento può essere usata per focalizzare la luce. La lente concentra la luce del Sole in una piccola macchia. Che forma ha la macchia? Perché ha quella forma?

22.14 Proiettore per diapositive e lavagna luminosa

Il proiettore per diapositive

Immaginiamo che i proiettori non esistano ancora e di volerli inventare. L'idea più semplice sarebbe questa: prendiamo una piccola immagine stampata, la illuminiamo per bene e, con l'aiuto di un obiettivo, la proiettiamo su una parete, fig. 22.34a.

Apparecchi del genere per proiettare immagini stampate esistono veramente. Si chiamano *episcopi*. Ti renderai subito conto del perché non si usano praticamente più. In fig. 22.34b è rappresentato il percorso della luce delle lampade che colpisce l'immagine nel punto P. Solo una piccola parte di questa luce passa attraverso l'obiettivo e va a colpire la pa-

rete. La maggior parte viene assorbita dalle pareti interne del proiettore. La causa sta nel fatto che la carta diffonde la luce. Viene respinta in tutte le direzioni invece di esserlo solo nella direzione che a noi interessa, cioè verso l'obiettivo.

Da qui la nostra prossima idea: come modello non usiamo un'immagine stampata ma una che non diffonda la luce: inventiamo la diapositiva. Su una diapositiva la luce viene assorbita o lasciata passare – ma non diffusa.

Il nostro primo tentativo di costruire un proiettore per diapositive è mostrato in fig.22.34c. A prima vista il proiettore non sembra male. Tutta la luce uscente dal punto A sulla diapositiva arriva sulla parete attraverso l'obiettivo. Lo stesso vale per la luce uscente dal punto B e dal punto C. Ma qui finisce il bello. La luce che passa dai punti D e E non colpisce l'obiettivo. Ciò che vediamo sulla parete è una bella immagine chiara e nitida – ma solo di una zona centrale e circolare al centro della diapositiva.

Quindi la nostra prossima invenzione è il *condensatore*, una grossa lente molto vicina alla diapositiva, fig. 22.34d. Devia i raggi di luce provenienti dalla lampada e fa in modo che passino tutti dall'obiettivo. Guardando la fig. 22.34d puoi renderti conto anche di come l'immagine della sorgente di luce venga riprodotta sull'obiettivo.

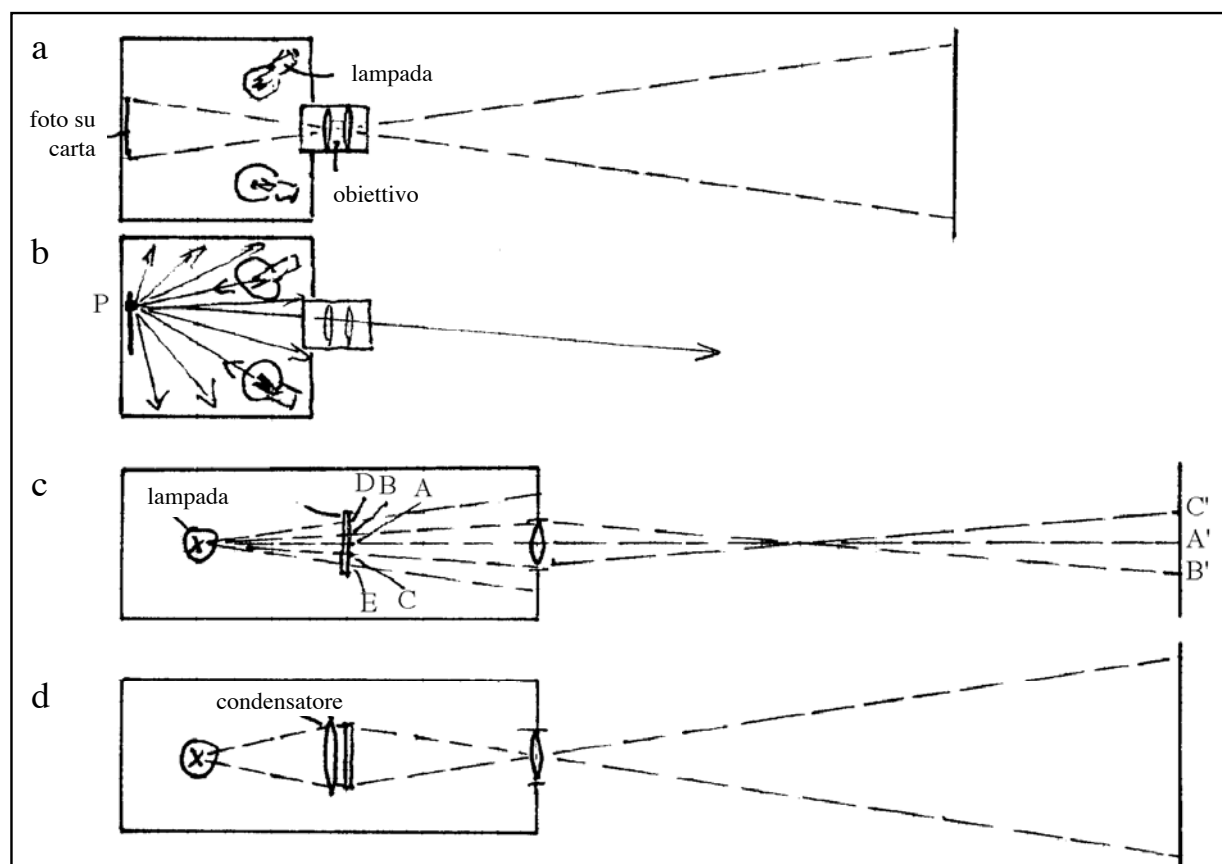


Fig. 22.34. (a) Episcopio. (b) In un episcopio molta luce va persa. (c) In una diapositiva la luce non viene diffusa, solo il centro della diapositiva viene proiettato. (d) Un condensatore devia verso lo schermo tutta la luce che attraversa la diapositiva.

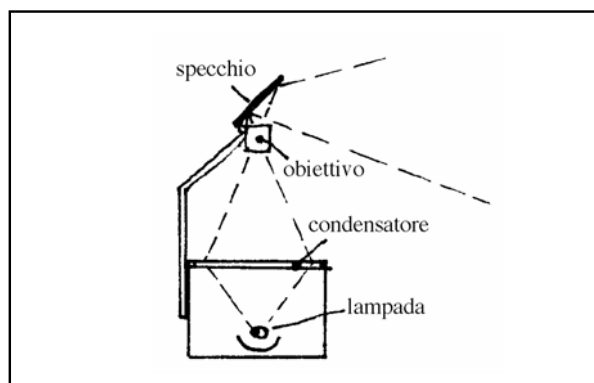


Fig. 22.35. Lavagna luminosa. Il condensatore di una lavagna luminosa è molto più grande di quello di un proiettore per diapositive.

Un ultimo passo per ottenere un proiettore moderno: dietro la lampada mettiamo uno specchio conico che raccoglie la luce emessa in quella direzione dalla lampada e la rimanda attraverso la diapositiva e verso l'obiettivo.

La lavagna luminosa

Non è molto diverso da un proiettore per diapositive, fig. 22.35. Una differenza evidente: la superficie di scrittura è orizzontale. Per fare in modo che la luce raggiunga lo schermo si usa uno specchio deviatore.

C'è un'altra differenza interessante rispetto al proiettore per diapositive. Visto che i lucidi da proiettare sono molto più grandi di una diapositiva, anche il condensatore deve essere molto grande. Ma una lente nel formato DIN-A4 sarebbe estremamente costosa. Per questo motivo come condensatore si usa una *lente di Fresnel*. Il funzionamento di una lente di Fresnel lo conosci già, lo abbiamo discusso nel paragrafo 22.5. Lì avevamo immaginato una lente composta da molti prismi di vetro di sezione triangolare. Una lente di Fresnel è una lastra di materiale plastico con una serie di anelli di profilo triangolare, fig. 22.36.

Ma se una lente di Fresnel costa meno di una lente normale, perché non si fanno anche degli obiettivi con le lenti i Fresnel? Per colpa delle sue scanalature, l'immagine generata da una lente di Fresnel non è così nitida come quella di una vera lente. Il condensatore non serve a generare un'immagine, quindi la nitidezza non conta. Il condensatore non è altro che una specie di imbuto per la luce.

Esercizi

1. Un proiettore per diapositive deve portare il massimo di luce allo schermo. Quindi potremmo pensare che l'obiettivo abbia il maggior diametro possibile. In effetti non è così. Perché no?
2. Gli episcopi hanno sempre obiettivi di grande diametro. Perché?
3. Un proiettore per diapositive deve generare un'immagine alta 2,40 m su uno schermo posto a 5 m di distanza. Quale deve essere la lunghezza focale dell'obiettivo? (Una diapositiva è alta 24 mm.)

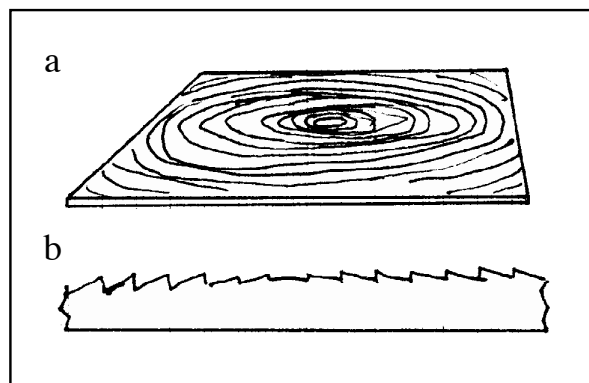


Fig. 22.36. Lente di Fresnel. (a) visione prospettica (b) sezione

22.15 Cineprese, macchine da proiezione, telecamere, videocamere

Una cinepresa non è molto diversa da una macchina fotografica e una macchina da proiezione non è molto diversa da un proiettore per diapositive.

Una cinepresa riprende delle immagini in rapida sequenza: l'otturatore viene aperto e poi chiuso, la pellicola avanza di un'immagine, l'otturatore si riapre e si richiude, la pellicola avanza ancora, ecc. tutto questo 24 volte al secondo. Il risultato è mostrato in fig. 22.37.

Una macchina da proiezione ha un funzionamento analogo: un'immagine viene proiettata come lo è una diapositiva da un proiettore per diapositive. Poi il percorso della luce viene interrotto, la pellicola trascinata in avanti di un'immagine, il percorso della luce riaperto poi chiuso, ecc. Le 24 immagini al secondo sono percepite come un'unica immagine in movimento.

Anche la telecamera funziona secondo il principio della macchina fotografica. Ma al posto della pellicola c'è un campo di sensori ottici che emettono dei segnali elettrici. Il segnale elettrico è più forte quando il sensore riceve più luce.

Quindi i dati ricevuti con la luce non sono immagazzinati immediatamente (come in una macchina

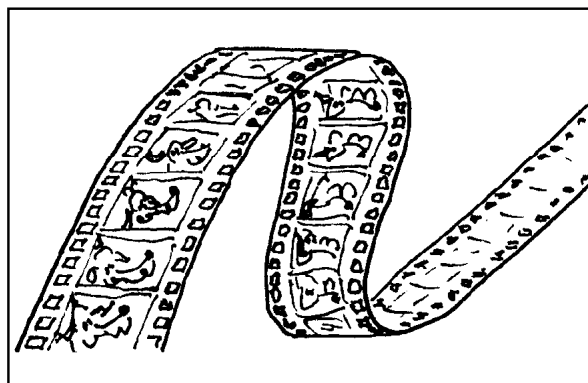


Fig. 22.37. La pellicola cinematografica è composta da una serie di immagini riprese a brevissimo intervallo l'una dall'altra.

fotografica o in una cinepresa) ma trasferiti al portatore di dati elettrico. Con l'elettricità raggiungono un registratore e lì vengono immagazzinati su una banda magnetica.

In una videocamera la banda magnetica fa parte dell'apparecchio.

Esercizi

1. Con una macchina da proiezione proiettiamo un film al contrario. Cosa vediamo sullo schermo se la pellicola passa nel proiettore a velocità costante?
2. La luce di una macchina di proiezione deve essere interrotta 24 volte al secondo: ogni qualvolta la pellicola viene trascinata. Se accendessimo e spegnessimo la luce allo stesso ritmo vedremmo una luce tremolante. Con un semplice trucco questo tremolio viene eliminato. Hai un'idea sul trucco da usare?

22.16 Il microscopio

Per ottenere un'immagine grande di un oggetto piccolo dobbiamo metterlo molto vicino al piano focale delle lenti usate, fig. 22.38a. L'apparecchio in fig. 22.38a è già quasi un microscopio. In un microscopio l'immagine non viene raccolta da uno schermo ma viene osservata direttamente con l'occhio, guardando nel microscopio dall'alto.

Affinché l'immagine sia più grande possibile, cioè affinché con l'occhio si possa andar il più vicino possibile all'immagine, la si osserva attraverso una lente di ingrandimento, fig. 22.38b. Questa lente di ingrandimento è un elemento essenziale di un microscopio. Si chiama *oculare*.

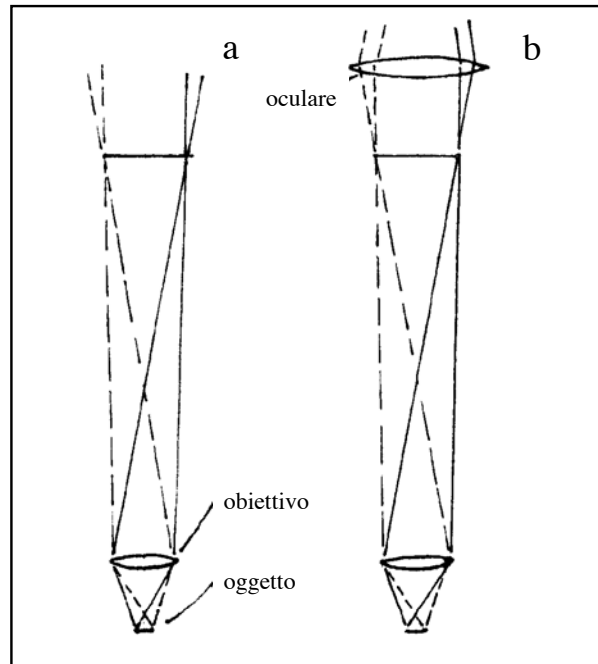


Fig. 22.38. Microscopio. (a) L'oggetto è vicino al piano focale. (b) L'oggetto viene osservato attraverso una lente (l'oculare).

22.17 Il cannocchiale

Un cannocchiale serve a fornire immagini grandi di oggetti lontani.

In precedenza avevamo visto come la grandezza di un'immagine dipende dalla lunghezza focale della lente o dell'obiettivo utilizzati.

In un cannocchiale l'immagine non finisce su uno schermo o su una pellicola, ma viene osservata direttamente. Come nel microscopio per avere un'immagine più grande si usa una lente di ingrandimento, un oculare, fig. 22.39.

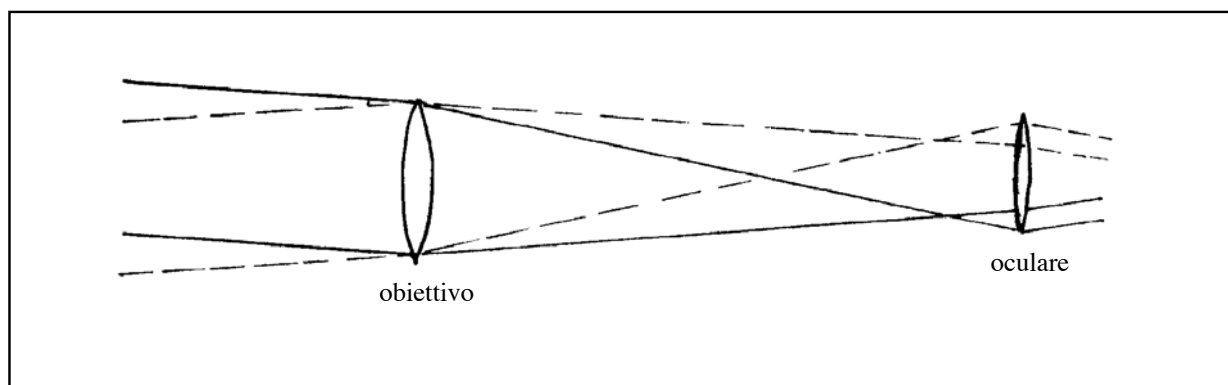


Fig. 22.39. Cannocchiale. Una lente con una grande lunghezza focale genera un'immagine. L'immagine viene osservata attraverso una lente (l'oculare).

22.18 Il telescopio

In sostanza un telescopio è un grande cannocchiale o una macchina fotografica con un teleobiettivo dalla grande lunghezza focale. I telescopi sono costruiti per l'osservazione del cielo.

Nell'osservazione delle stelle sorge un problema: se guardiamo il cielo notturno a occhio nudo, in condizioni ideali vedremmo circa 3000 stelle – una piccolissima frazione di tutte le stelle esistenti. Non si sa quanto stelle ci siano. La maggior parte non è visibile perché sono troppo lontane e troppo poca della loro luce ci raggiunge. Quindi per vedere stelle lontane si genera un'immagine con un obiettivo che ha una grande sezione. Maggiore la sezione, più luce contribuisce all'immagine.

Non si riesce a costruire delle lenti più grandi di 1 m di diametro. Per telescopi ancora più grandi la lente è sostituita da uno specchio parabolico. Come la lente anche lo specchio parabolico genera immagini.

Il più grande telescopio a specchio esistente ha un diametro di circa 8 m.

La Terra non riceve solo luce visibile dall'universo. Arrivano anche molti tipi di luce non visibile. Tutte

queste radiazioni portano informazioni interessanti sulla struttura dell'universo e sui processi che si svolgono in altre stelle e altre galassie. Anche queste radiazioni vengono osservate e analizzate.

Per ogni tipo di radiazione, per ogni tipo di luce, si usa un telescopio adatto: apparecchi che generano un'immagine raccogliendo il più possibile della radiazione corrispondente.

I *radiotelescopi* sono molto simili ai telescopi ottici: apparecchi che raccolgono radiazione la cui lunghezza d'onda è molto più grande di quella della luce visibile. In questi telescopi lo specchio è una semplice rete metallica. Quindi è molto più facile costruire grandi radiotelescopi invece di telescopi per luce visibile. Il più grande telescopio mobile del mondo ha uno specchio di 100 m di diametro.

Esercizi

1. Possiamo utilizzare la parabola per la televisione satellitare come radiotelescopio. Cosa e come possiamo osservare?
2. Il diametro massimo della pupilla di un occhio umano è circa 8 mm. Quanta luce in più raccoglie lo specchio di un telescopio di 6 m di diametro?

23. I colori

23.1 Lo spazio tridimensionale dei colori

La parola colore è riferita a una percezione. Qui di seguito discuteremo l'effetto che la luce ha sul nostro occhio. Quindi non ci occupiamo di tutta l'immagine che si forma sulla retina, ma solo di un punto di questa immagine.

Naturalmente la percezione del colore dipende dal tipo di luce in questione. In generale, un certo punto della retina non è colpito da luce pura di un solo tipo, ma da una mescolanza di tipi di luce. Si potrebbe pensare che mescolanze diverse generino percezioni diverse. In effetti non è così. Ci sono molte più mescolanze di luce che non tipi diversi di percezione. In altre parole: molte mescolanze di luce molto diversi possono generare la stessa percezione.

Occupiamoci ora della sensibilità ai colori e chiediamoci quali tipi di luce generino una determinata percezione.

Cominciamo dalla discussione di un problema molto comune: si deve "trasmettere" una percezione cromatica. Un esempio: sei al telefono e vuoi descrivere a una tua amica il colore della tua nuova T-Shirt. Un altro esempio: un'emittente televisiva deve "comunicare" in permanenza al televisore il colore dei vari punti sullo schermo.

Vogliamo scoprire in che modo effettuare una trasmissione o comunicazione del genere. Per rendere più chiaro il problema, cominciamo a occuparci di una situazione diversa ma dove si deve affrontare la stessa difficoltà.

Vuoi spiegare a un tuo amico in America dove si trova il paese nel quale abiti. Tra le varie possibilità hai anche queste:

1. Gli dici il nome del paese.
2. Gli comunichi latitudine e longitudine del paese.

Se usi il primo metodo, il tuo amico dovrà cercare il nome nell'indice di un atlante. Lì troverà le coordinate che gli permetteranno di localizzare il paese in una cartina geografica.

Il secondo metodo è più semplice nel senso che bastano due numeri. Possiamo dirlo così: ci sono due

assi di coordinate, la latitudine e la longitudine. Se diciamo in quale punto delle due scale si trova il paese, ne avremo descritto la posizione in modo univoco.

Ora torniamo ai colori. Volevi dire alla tua amica che colore ha la tua T-Shirt. Il problema è analogo a quello descritto prima. C'è una lunga lista di nomi di colori: giallo, rosso, blu, arancione, ocra, rosa e molto altri nomi noti e anche altri meno usati ma più precisi, come il giallo cadmio o il verde ossido di cromo.

Invece del nome del paese possiamo dare le sue coordinate. Invece del nome di un colore, fig. 23.1, possiamo descriverlo con delle coordinate.

Facciamo un'altra divagazione:

Per dire a qualcuno quanto fa caldo, basta comunicare un solo dato: la temperatura. Una sola scala è sufficiente.

Per dire a qualcuno dove abito devo dargli due indicazioni: latitudine e longitudine. Ci vogliono due scale.

Quando il comandante di un aereo vuole comunicare la sua posizione alla torre di controllo, deve dare tre valori: latitudine, longitudine e altitudine di volo. Ci vogliono tre scale.

Torniamo ai colori. Quante indicazioni ci vogliono per descrivere un colore? Quante scale ci vogliono per classificare in modo univoco una percezione cromatica?



Fig. 23.1. È difficile descrivere un colore con un nome proprio.

Sicuramente hai già posseduto un set di pennarelli colorati. E sicuramente avrai già provato a ordinarli in sequenza. E sicuramente non ce l'hai fatta. Viola – blu – turchese – verde – ecc. Per molti colori trovi subito il posto, ma poi c'era quel pennarello blu scuro che non andava messo tra il viola e il blu ma neanche tra il blu e il turchese.

Questa considerazione significa che non è possibile ordinare i colori su un'unica scala. Ci vuole più di un asse di coordinate. In altre parole: lo spazio dei colori non è a una dimensione.

Potresti provare con due scale, con una disposizione bidimensionale. Ma nemmeno così funzionerebbe. Abbiamo bisogno di tre scale.

Lo spazio dei colori è tridimensionale.

La percezione dei vari colori si differenzia per tre caratteristiche. Queste caratteristiche sono la *tonalità cromatica*, la *saturatione* e la *luminosità*.

Immagina di avere davanti un grande numero di cubi colorati rappresentanti praticamente tutti i colori distinguibili.

Dapprima togliamo tutti i cubi dai colori intensi. Questi si possono mettere in sequenza. È interessante notare come questa sequenza possa essere chiusa in un cerchio, fig. 23.2, detto *cerchio cromatico*. I vari colori si distinguono per la tonalità. Naturalmente il confine tra due colori non è netto. A dodici di questi colori diamo un nome, fig. 22.3:

Rosso – rosso arancione – arancione – giallo – gialloverde – verde – turchese – ciano – blu – viola – porpora – magenta

Invece dei nomi avremmo potuto usare i numeri da 1 a 12.

Tra i cubi che restano ce ne sono altri con queste stesse tonalità di colore. Per esempio, oltre al cubo di colore blu intenso ce ne sono di colore più pallido e altri di colore più scuro. E anche di colore pallido e scuro. Quindi "pallido" e "scuro" non sono caratteristiche che si escludono a vicenda.

Anche i cubi di colore blu chiaro possono essere messi in sequenza. A un'estremità c'è il blu intenso, nel mezzo i blu pastello e all'altra estremità il bian-

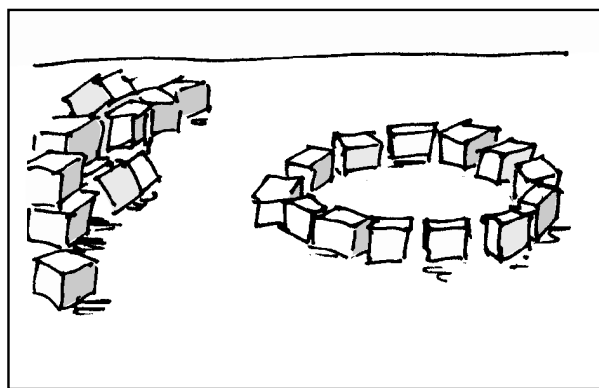


Fig. 23.2. Tutti i colori intensi possono essere ordinati in una scala chiusa, il cerchio cromatico.

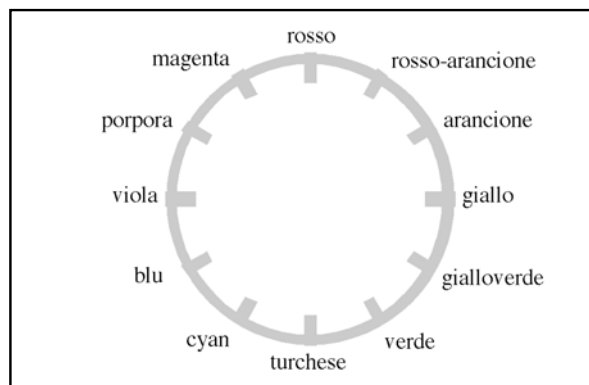


Fig. 23.3. Il cerchio cromatico.

co. Quindi, per ogni colore intenso c'è una sequenza di transizione al bianco. Si dice che nella transizione da un colore intenso al bianco la saturazione cambia. I colori intensi sono i più saturi, il bianco ha saturazione zero. Inseriamo i cubi con i colori pallidi nel cerchio cromatico intensi in modo che la saturazione diminuisca verso il centro del cerchio. Proprio al centro ci sarà il cubo bianco. Abbiamo ottenuto un *disco cromatico*, fig. 23.4.

Da ultimo, per ognuno dei cubi blu con le diverse saturazioni cerchiamo dei cubi che abbiano la stessa saturazione ma una luminosità diversa. Luminosità più piccola significa cubo più scuro.

Usiamo la parola "chiaro" con un significato un po' diverso da quello comune: ciò che normalmente viene chiamato blu chiaro è in effetti un blu pallido, cioè poco saturo. Noi invece parliamo di blu chiaro quando dal punto corrispondente arriva molta luce blu.

Quindi si può caratterizzare la percezione dei colori indicando i valori delle tre grandezze "tonalità", "saturazione" e "luminosità". Ciò significa che con i nostri cubi possiamo costruire una struttura tridimensionale simile a un cilindro, fig. 23.5. I colori chiari e saturi sono sul bordo esterno della parte superiore. Verso il centro diminuisce la saturazione. Al centro della parte più in alto c'è il bianco. Verso il basso diminuisce la luminosità. Lungo l'asse del cilindro si trovano in cima il bianco e, man mano che

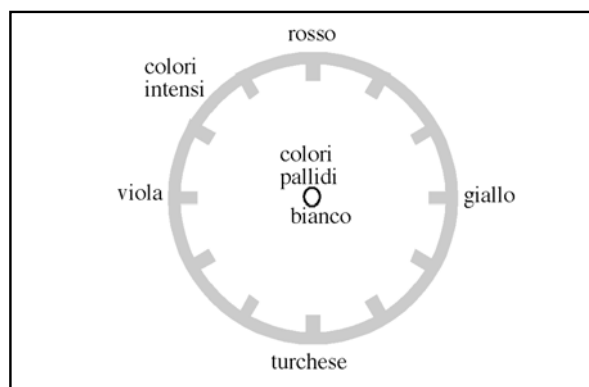


Fig. 23.4. Disco cromatico. I colori intensi sono all'esterno, quelli pallidi al centro.

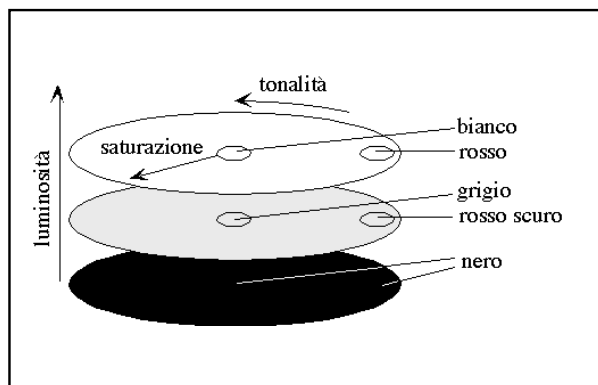


Fig. 23.5. Il cilindro cromatico è un modello dello spazio dei colori.

si scende, tonalità di grigio sempre più scure. Tutta la faccia inferiore del cilindro è nera. Questo cilindro è un modello che rappresenta lo spazio dei colori.

Definiamo le varie tonalità con i 12 nomi in fig. 23.3. Quindi "blu" non significa solo il blu intenso ma anche quello pallido e quello scuro.

Nel linguaggio comune si usano molti nomi di colori che non determinano solo la tonalità ma anche la saturazione, la luminosità o entrambe. Nella tabella 23.1 trovi alcuni esempi.

Ora dovresti essere in grado di descrivere qualsiasi colore grazie alla sua tonalità, saturazione e luminosità. Anche se è un colore "sporco" o "indefinibile".

La percezione dei colori è caratterizzata da tre grandezze: tonalità, saturazione e luminosità.

Esercizi

1. Oltre al cilindro ci sono altri modi di rappresentare lo spazio dei colori. Come?
2. Discuti la questione dell'inizio e della fine delle scale per tonalità, saturazione e luminosità.
3. La scala delle tonalità è una scala chiusa in se stessa. Cita altre grandezze i cui valori siano in una scala chiusa.
4. Descrivi i colori dei seguenti oggetti con delle stime qualitative di tonalità, saturazione e luminosità.

Panino, cacao in polvere, cioccolata da bere, cola, carciofo, la tua pelle, ruggine, pavimento, pareti e soffitto dell'aula, carrozze dei treni.

Tabella 23.1. Tonalità, saturazione e luminosità di alcuni colori noti.

Nome	Tonalità	Saturazione	Luminosità
oliva	gialloverde	forte	media
beige	giallo	debole	media
rosa	rosso	debole	forte
marrone	arancione	forte	debole

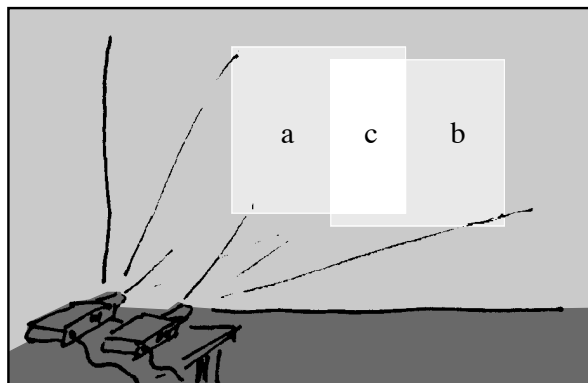


Fig. 23.6. I due quadrati di luce generati dai proiettori si sovrappongono nel settore c.

23.2 Le mescolanze di luce

Sperimentiamo con due proiettori per diapositive. Ma al posto delle diapositive inseriamo dei filtri colorati. Sulla parete ogni proiettore genera un quadrato colorato. Orientiamo i proiettori in modo che i quadrati siano parzialmente sovrapposti, fig. 23.6.

Dalla zona a proviene la luce di un proiettore, dalla zona b la luce dell'altro. Dalla zona c proviene contemporaneamente luce di un tipo e dell'altro. Chiamiamo A, B e C i tre tipi di luce corrispondenti. La luce proveniente da c è una mescolanza delle luci che provengono da a e da b.

Ci serviamo del proiettore per mostrare nuovamente il significato dei concetti di luminosità e saturazione.

Inseriamo un filtro verde in entrambi i proiettori. I colori A e B sono verde saturo. Qual è il colore C della luce proveniente dalla zona c? La tonalità e la saturazione di C devono essere uguali a quelle di A e B. Però da ogni centimetro quadrato della zona c proviene il doppio di luce che da un centimetro quadrato in a o in b. Quindi la differenza tra C e gli altri colori è la luminosità, fig. 23.7.

Ora togliamo un filtro. Dal proiettore corrispondente la parete riceve luce bianca. La luce della zona a è verde saturo, quella della zona b semplicemente bianca. Il colore della zona c sembra un verde pallido. Quindi C è un verde poco saturo. Inoltre C ha

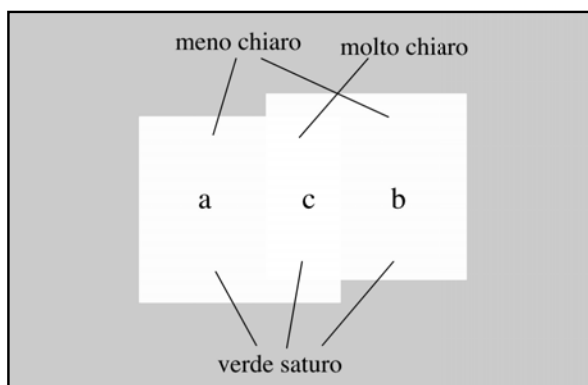


Fig. 23.7. Nella zona di sovrapposizione c la luminosità è maggiore che in a e b.

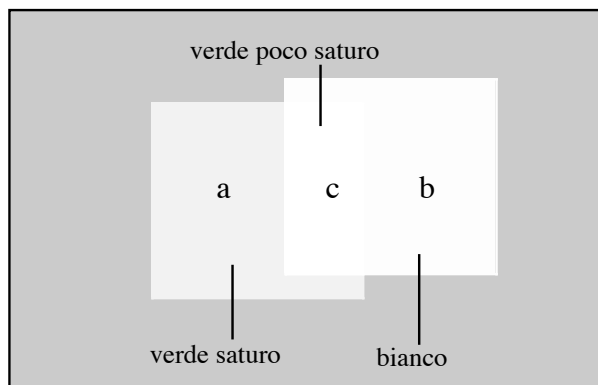


Fig. 23.8. Il verde in a è saturo. Il verde nella zona di sovrapposizione ha poca saturazione.

una luminosità maggiore di A e di B, fig. 23.8. Quindi per ridurre la saturazione di un colore si aggiunge luce bianca.

Ora facciamo una mescolanza più complessa. Nel proiettore vengono inseriti filtri colorati diversi. Cominciamo con un filtro rosso nel primo e un filtro giallo nel secondo. Il colore A è rosso, il colore B è giallo e il colore C è arancione, fig. 23.9.

Non sarai certo sorpreso dai risultati. Vale comunque la pena fare un piccolo ragionamento. La zona c appare di colore uniforme. Non vediamo i singoli colori rosso e giallo. Il nostro occhio "lavora" diversamente dall'udito. Se da un altoparlante escono suoni prodotti da strumenti diversi, noi possiamo distinguere questi strumenti.

Per i prossimi esperimenti usiamo solo dei filtri colorati che proiettino un colore saturo, quando la loro luce non è mescolata con quella di un'altra sorgente.

Constatiamo che con l'aiuto del cerchio cromatico si può facilmente prevedere il colore della mescolanza di due tipi di luce.

Sul cerchio cromatico due colori qualsiasi A e B sono collegati da due archi di cerchio, fig. 23.10. Se A e B non sono agli opposti uno degli archi è più corto dell'altro. La tonalità della mescolanza tra A e B è sempre una tonalità sull'arco più corto. Il colore della mescolanza è saturo quando A e B sono molto vicini, cioè quando l'arco è molto breve.

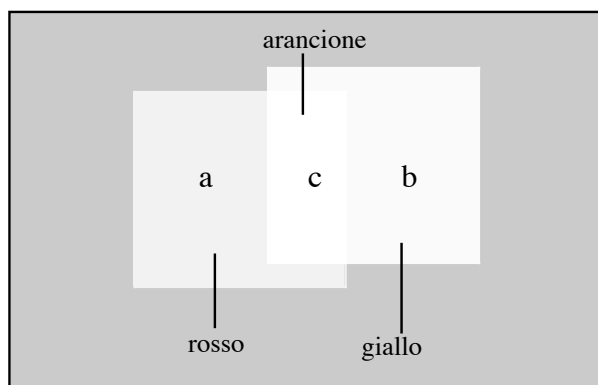


Fig. 23.9. Anche se nella zona di sovrapposizione ci sono due tipi di luce, la percezione è di un colore solo.

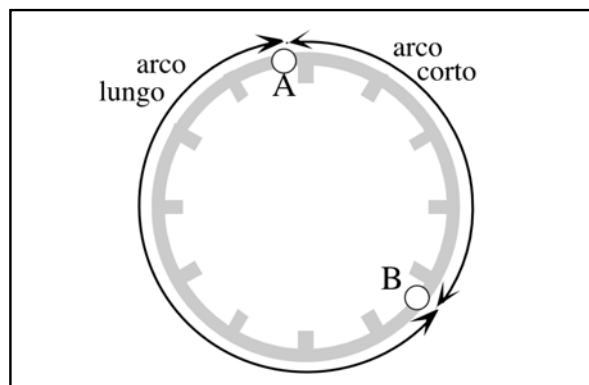


Fig. 23.10. Sul cerchio cromatico i colori A e B sono collegati da due archi di cerchio.

Più l'arco corto è lungo, meno sarà saturo il colore C. Se A e B sono agli opposti sul cerchio, il colore della mescolanza non sarà per niente saturo: è bianco.

Esempi: arancione e gialloverde sono abbastanza vicini. Il colore della mescolanza è un giallo abbastanza saturo, fig. 23.11 a. Il rosso arancione e il verde sono più lontani. Il colore della mescolanza è ancora giallo, ma meno saturo di prima, fig. 23.11 b. Infine, rosso e turchese sono molto lontani sul cerchio; più lontani di così non potrebbero essere. Il colore della mescolanza è totalmente insaturo, cioè bianco, fig. 23.11 c.

Il colore B che mescolato al colore A dà bianco, viene detto *colore complementare* di A. Così il blu è il colore complementare del rosso-arancione, il magenta lo è del verde e il rosso del turchese.

Il fatto che mescolando i colori agli opposti sul cerchio cromatico si ottenga bianco, non è casuale: la posizione dei colori sul cerchio è stabilita proprio in modo che i colori complementari si trovino agli opposti.

Facciamo ancora una mescolanza di luce più complicata. Usiamo tre proiettori e li orientiamo in modo da ottenere tre zone con due colori sovrapposti e una zona dove si sovrappongono tutti e tre i colori iniziali, fig. 23.12.

Proviamo a ottenere il colore bianco mescolando tre colori. Forse hai già intuito come fare. Le posizioni dei tre colori sul cerchio corrispondono ai vertici di un triangolo equilatero, fig. 23.13. Per esempio si ottiene:

rosso + gialloverde + blu = bianco

porpora + turchese + arancione = bianco

Analogamente possiamo ottenere luce bianca con 4 proiettori se sul cerchio i 4 colori formano un quadrato (a dire il vero funziona anche con un rettangolo). E potremmo usare ancora più proiettori. Ogni volta che sul cerchio i singoli colori formano un poligono regolare, il colore della mescolanza è bianco. In linea di massima la luce bianca solare, la luce di una lampadina o di una lampada al neon si

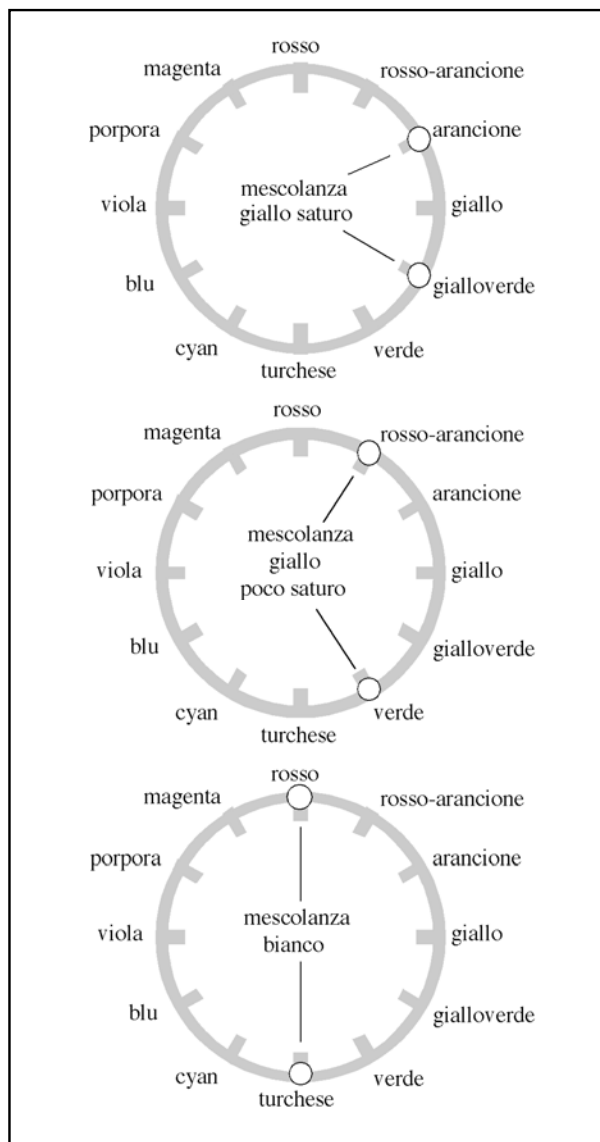


Fig. 23.11. (a) Arancione + gialloverde = giallo saturo
 (b) Rosso arancione + verde = giallo poco saturo
 (c) Rosso + turchese = giallo per niente saturo = bianco

formano allo stesso modo. Tutte queste sorgenti di luce emettono una mescolanza di diversi tipi di luce posti sul bordo del cerchio cromatico.

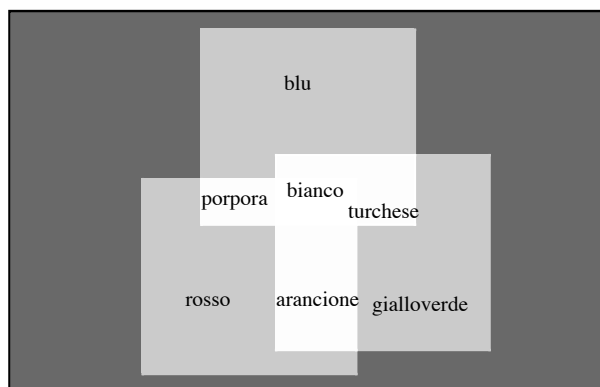


Fig. 23.12. Qui ci sono tre zone di sovrapposizione di due colori e una di sovrapposizione di tre colori.

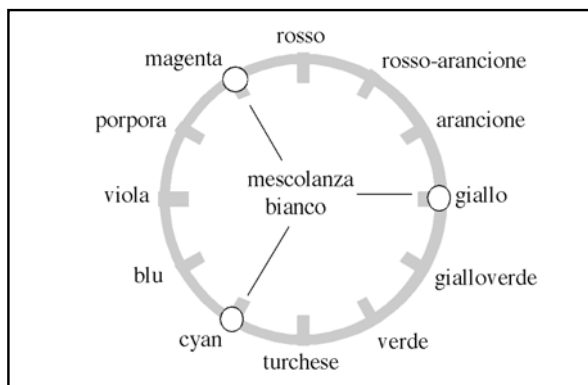


Fig. 23.13. Tre colori che sul cerchio cromatico formano un triangolo equilatero, mescolandosi danno il bianco.

23.3 Come si inganna l'occhio – l'immagine televisiva

Mescoliamo luce nel seguente modo: da un unico punto dello schermo escono allo stesso tempo luce verde e luce blu. Il risultato viene percepito come turchese.

Possiamo mescolare verde e blu anche in modo meno accurato, pur continuando a percepire turchese. In altre parole possiamo ingannare l'occhio. Ci sono due modi per farlo.

Le componenti non arrivano allo stesso tempo

Su un disco ci sono settori di colore diverso. Il disco viene messo in un locale buio, illuminato da un potente fascio di luce bianca e fatto girare rapidamente, fig. 23.14. Non vediamo più i singoli colori. Tutto il disco sembra dello stesso colore, cioè del colore della mescolanza. Quindi: se abbiamo un settore rosso e uno giallo vediamo arancione; se abbiamo tre settori, uno rosso, uno gialloverde e uno blu, vediamo bianco. Più precisamente: bianco scuro, cioè grigio.

Le componenti non arrivano dallo stesso punto

La luce verde e la luce blu non devono per forza provenire dallo stesso punto. Questo significa anche che i due tipi di luce non devono per forza colpire la retina nello stesso punto. È sufficiente che il punto di provenienza della luce verde sia tanto vicino a quello di provenienza della luce blu da impedire

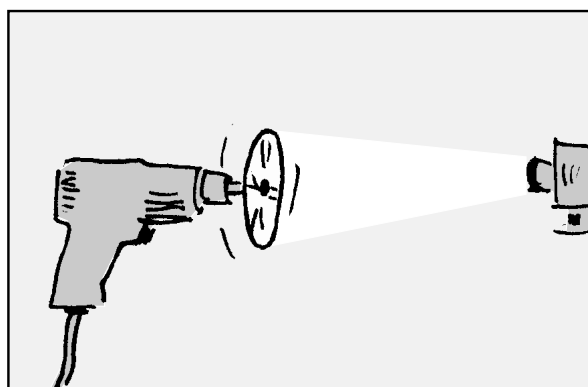


Fig. 23.14. Se il disco ruota molto velocemente il colore che vediamo è la mescolanza dei colori dei settori del disco.

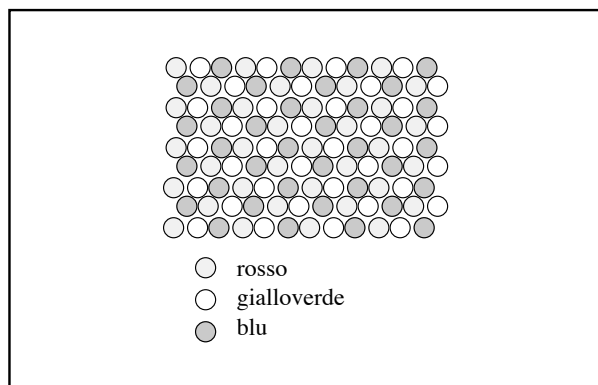


Fig. 23.15. Dettaglio dello schermo di un televisore. Ci sono tre tipi di pixel.

all'occhio di "risolverli".

Questa opportunità viene sfruttata spesso. Lo schermo di un televisore e quello di un computer sono una griglia di piccole macchie detti *pixel*. Ce ne sono di tre tipi. I primi possono emettere luce rossa, i secondi gialloverde e i terzi blu, fig. 23.15. Prova a guardare uno schermo da molto vicino, meglio ancora se con una lente di ingrandimento.

Quando tutti e tre i tipi di pixel sono accesi, da lontano non si distinguono più i singoli punti rossi, gialloverdi e blu, ma si vede solo bianco. Se sono accesi solo quelli rossi e gialloverdi si vede giallo e così via.

Con l'aiuto di questi tre tipi di pixel possiamo riprodurre tutti i colori. I pixel non solo possono essere accesi o spenti, ma ognuno di loro può essere regolato per essere più chiaro o più scuro. Facciamo qualche esempio.

I pixel rossi e quelli blu sono completamente spenti. Lo schermo è semplicemente gialloverde. Se aumentiamo lentamente e progressivamente la luminosità dei pixel rossi, lo schermo dapprima vira al giallo e infine, quando i pixel rossi hanno la massima luminosità, all'arancione. Se ora diminuiamo la luminosità dei pixel gialloverdi, lo schermo diventa sempre più rosso, fino a esserlo completamente quando i pixel gialloverdi sono spenti.

Allo stesso modo si può passare dal rosso, via porpora, al blu e dal blu, via turchese, nuovamente al gialloverde.

I colori pallidi si ottengono quando alla luce dei pixel di due tipi viene aggiunta luce proveniente dal terzo tipo. Se tutti e tre i tipi di pixel sono accesi al massimo della luminosità, otteniamo bianco.

Esercizi

1. Come va regolata la luminosità dei tre tipi di pixel di uno schermo affinché appaiano i seguenti colori? Giallo, viola, rosa, verde oliva, ocre, grigio scuro.

2. Abbiamo affermato di poter riprodurre tutti i colori con i pixel dello schermo di un televisore. Questa affermazione non è del tutto corretta. Perché no?

23.4 Ancora sullo spazio dei colori

Vogliamo di nuovo comunicare a qualcuno la posizione del paese dove viviamo. Come ricordi: due numeri, la latitudine e la longitudine, sono sufficienti. Ora ipotizziamo che tutta la zona sia ricoperta da strade che formano una griglia quadrata. Non strade in direzione nord-sud o est-ovest ma in diagonale: in parte in direzione sudovest-nordest e in parte in direzione sudest-nordovest, fig. 23.16. Quindi le strade formano un sistema di coordinate. L'origine è posta nella capitale della nazione.

Ora possiamo indicare la posizione del paese in modo diverso. Ancora una volta servono due numeri: la coordinata nordest e la coordinata nordovest. Ne traiamo una conclusione importante: indipendentemente dal sistema di coordinate usato, ci vogliono sempre due numeri. La fig. 23.17 mostra una terza possibilità. In questo caso la posizione del paese è caratterizzata dalla distanza r dall'origine e dall'angolo α rispetto alla retta g : ancora due numeri.

Con i colori la situazione è simile, anche se le indicazioni da dare sono tre. Più precisamente si tratta anche in questo caso di tre *numeri*. Finora non ci siamo preoccupati della taratura della scala cromatica. La posizione di una percezione cromatica sulle tre scale è solo approssimativa.

Come per il paese, anche il sistema di coordinate dei colori può essere scelto. E indipendentemente dalla scelta ci vorranno sempre tre indicazioni per descrivere una percezione cromatica.

Abbiamo già visto due diversi sistemi di coordinate per i colori:

1. tonalità – saturazione – luminosità
2. luminosità del rosso – luminosità del gialloverde – luminosità del blu.

Nel secondo caso si dice anche che per descrivere i colori si usano tre *colori fondamentali*, cioè rosso gialloverde e blu.

Puoi sicuramente immaginare altri sistemi di coordinate per i colori. Come colori fondamentali sce-

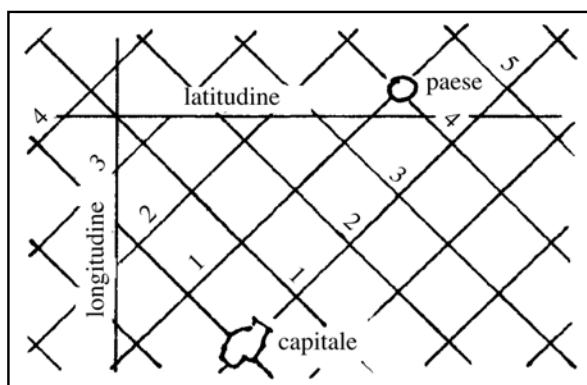


Fig. 23.16. Le strade formano un sistema di coordinate ruotato di 45° rispetto a latitudine e longitudine.

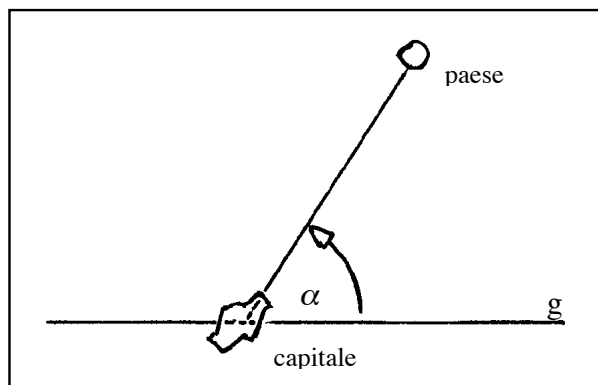


Fig. 23.17. La posizione del paese è determinata dalla distanza dalla capitale e dall'angolo rispetto a g .

gliamo tre colori che formino un triangolo equilatero nel cerchio cromatico, per esempio:

arancione – turchese – porpora.

Sull'asse delle coordinate è riportata la luminosità di questi tre colori.

Si potrebbero costruire degli schermi per televisore con i pixel di questi colori. In quel caso allo schermo si comunicano le coordinate arancione-turchese-porpora invece di rosso-gialloverde-blu.

Esercizio

Immagina che lo schermo di un televisore abbia i pixel di colore arancione – turchese – porpora (invece di rosso – gialloverde – blu). Come si deve regolare la luminosità dei tre tipi di pixel per percepire i seguenti colori? Rosso, blu, rosa, bianco, marrone, nero.

23.5 Gli spettri

In questo paragrafo non discutiamo l'effetto della luce nel nostro occhio ma ci occupiamo della composizione della luce stessa.

Di solito la luce è una mescolanza di parecchi tipi di luce, visibile e non visibile.

Qui ci occuperemo della composizione della luce, ignorando il fatto che la luce ci permette di vedere e di percepire i colori.

Il primo problema: vogliamo descrivere la composizione di una certa mescolanza di luce. Forse penserai: lo sappiamo già fare. Sappiamo già che ci bastano tre valori. Sbagliato! Con tre valori possiamo descrivere la percezione della luce nel nostro occhio, non la composizione della mescolanza, in quanto molte composizioni diverse generano la stessa percezione.

Per capire come descrivere una mescolanza, discutiamo dapprima un problema diverso ma simile.

Vogliamo rappresentare graficamente la distribuzione di età della popolazione di una città. La fig.

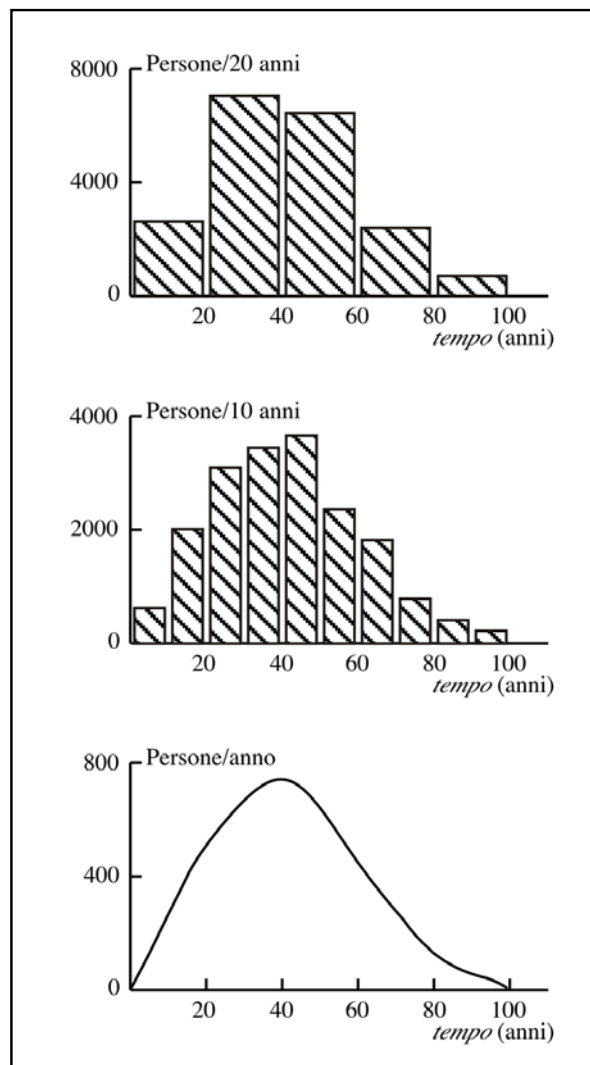


Fig. 23.18. Rappresentazione grafica della struttura demografica di una città.

(a) Intervalli di venti anni. (b) Intervalli di dieci anni. (c) Rappresentazione continua.

23.18a mostra una possibilità. Le persone sono raggruppate per classi d'età: da 0 a 20 anni, da 20 a 40 anni, ecc. Tutti fanno parte di una di queste classi.

Noti subito che la descrizione non è molto dettagliata. Non si possono nemmeno distinguere i neonati dai maturandi. Provvediamo immediatamente: scegliamo intervalli più piccoli, fig. 23.18b. E se non basta possiamo continuare a suddividere le singole classi. A un certo punto i passi sono così piccoli da permettere la rappresentazione delle classi d'età della popolazione mediante una linea continua, fig. 23.18c. Questa linea viene detta curva demografica.

Il nostro problema con la luce è molto simile. Ricordiamo innanzitutto che la luce è sempre in movimento. Con la luce si ha sempre a che fare con correnti.

La luce è il risultato dei vari contributi a lunghezze d'onda diverse. (Ricorda: la luce "visibile" ha una lunghezza d'onda compresa tra 400 nm e 800 nm.)

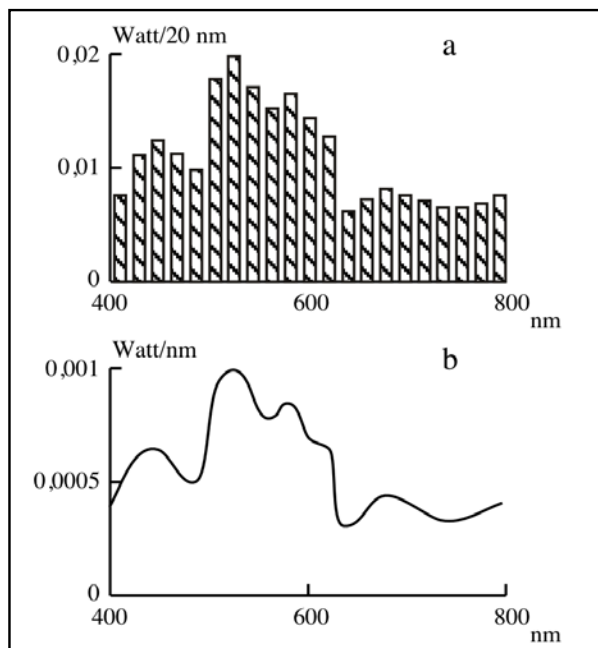


Fig. 23.19. Rappresentazione grafica della composizione di una mescolanza di luce.

(a) Intervalli di 20 nm. (b) Rappresentazione continua.

Per rappresentare la composizione di una certa mescolanza, suddividiamo l'asse delle lunghezze d'onda in intervalli, per esempio intervalli di 20 nm. La colonna sopra ogni intervallo ci dice quanta luce di quel tipo c'è nella mescolanza, fig. 23.19a. Come misura della corrente di luce, usiamo l'intensità della corrente di energia, il numero di joule al secondo trasportati dalla luce di quell'intervallo.

Gli intervalli potrebbero ancora essere troppo grandi. Affiniamo la suddivisione fino a ottenere una linea continua: uno spettro, fig. 23.19b.

Gli *spettrometri* sono gli apparecchi che registrano lo spettro. In molti spettrometri la scomposizione della luce avviene grazie a un prisma.

Un'approssimazione dello spettro di una certa mescolanza di luce, si può ottenere scomponendo la luce con un prisma e proiettando su uno schermo i raggi ottenuti. Osserviamo lo spettro di diverse sorgenti di luce. La fig. 23.20a mostra lo spettro della luce solare, la fig. 23.20b quello di una lampadina e la fig. 23.20c lo spettro di una cosiddetta lampada a vapori di sodio. Lo spettro solare e quello della lampadina contengono luce di tutte le lunghezze d'onda. La lampada a vapori di sodio contiene praticamente solo luce di una lunghezza d'onda: *luce monocromatica*. Ci sono molte altre lampade che emettono luce di una sola lunghezza d'onda o di poche lunghezze d'onda diverse. Si chiamano lampade spettrali.

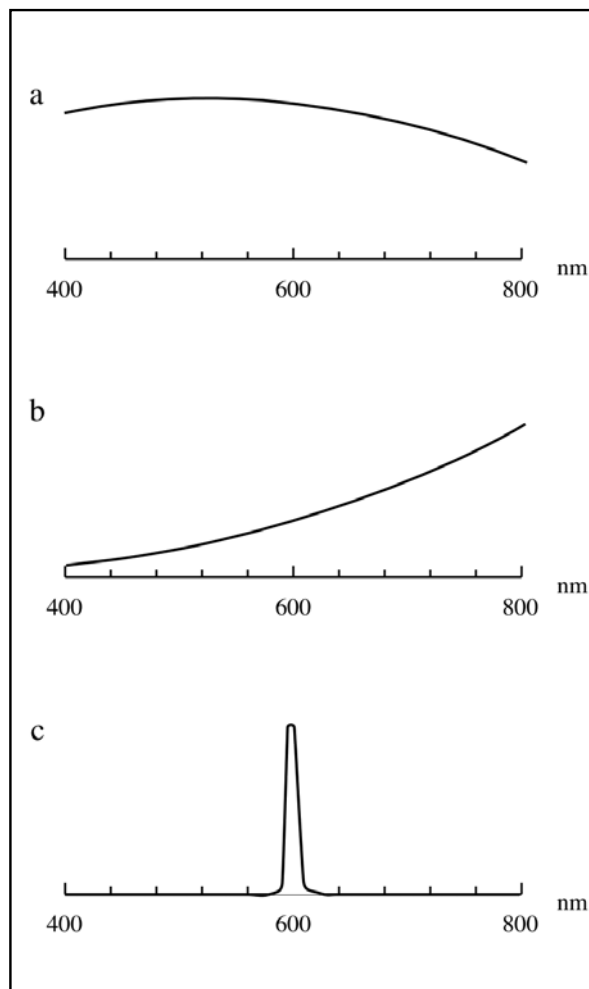


Fig. 23.20. Spettri. (a) Luce solare. (b) Luce di una lampadina a incandescenza. (c) Luce di una lampada a vapori di sodio.

23.6 La relazione tra lo spettro e la percezione dei colori

Riprendiamo il nostro disco cromatico, cioè la superficie superiore del cilindro cromatico: tutti i colori hanno una grande luminosità. Sul bordo esterno si trovano i colori saturi. Andando verso il centro la saturazione diminuisce. Al centro del disco c'è il bianco. Quali spettri corrispondono alle diverse percezioni cromatiche rappresentate sul disco cromatico?

La luce monocromatica produce sempre una percezione con il massimo della saturazione.

Il contrario non è sempre valido, cioè non sempre una percezione di colore saturo è provocata da luce monocromatica. Vale solo per quei colori indicati da una linea tratteggiata in fig. 23.21.

Ogni colore che non si trova sul bordo del disco cromatico può essere prodotto da spettri diversi. Meno saturo è il colore, più varianti ci sono. Del bianco abbiamo già parlato. Otteniamo bianco per esempio mescolando due tipi di luce all'opposto sul cerchio cromatico.

Notiamo anche: con l'eccezione dei colori sul bordo esterno del disco, a tutti i colori è associato più di uno spettro.

I nostri occhi percepiscono poco o niente della complessità di uno spettro. È un esempio di *riduzione di dati*. Con lo spettro i nostri occhi ricevono una grande quantità di dati, ma solo pochi vengono trasmessi al cervello. Per così dire, invece di tutto lo spettro, al cervello vengono comunicati solo tre numeri. (Non dimenticare che stiamo parlando di un solo punto dell'immagine, cioè di un solo punto sulla retina.)

Finora abbiamo ignorato un problema. I colori saturi che si trovano tra il rosso e il viola – porpora, magenta... - non corrispondono a luce monocromatica. Questi colori vengono detti *colori purpurei*. Sulla scala delle lunghezze d'onda, sopra il rosso la luce non diventa porpora ma infrarossa, cioè non visibile. E neanche sotto il viola c'è il porpora ma l'ultravioletto, pure non visibile.

Per percepire i colori purpurei saturi si devono mescolare *due* tipi di luce pura: luce rossa e luce viola. A dipendenza del contributo delle componenti, il colore percepito sarà più vicino al rosso o al viola.

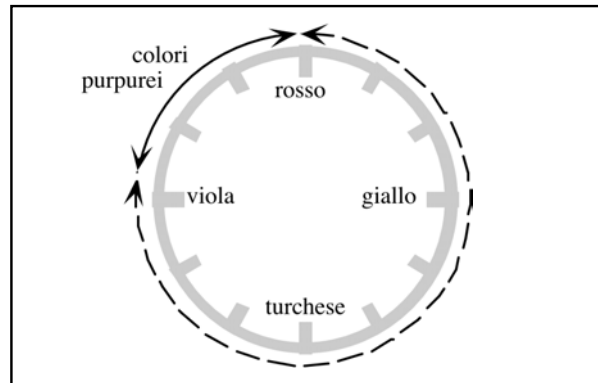


Fig. 23.21. Solo i colori nella parte tratteggiata del cerchio cromatico corrispondono a un solo tipo di luce.

Esercizi

1. Schizza due spettri che generano la percezione del giallo pallido.
2. Schizza tre spettri che generano la percezione del bianco.

Indice analitico

- aberrazione 119
- acciaio 50
- alfabeto Morse 16
- alimentatore 31
- alta tensione 71
- alternatore 26, 65
- altoparlante 10
- ampere 27
- amperometro 27, 61
- amplificatore 79
- anodo 77
- antenna parabolica 103
- apparecchio di registrazione 20
- apparecchio di riproduzione 20
- apriporta 61
- asse ottico 114
- assorbimento 97
- atomo 69

- bit 13
- bobina 59
 - di deflessione 77
 - primaria 65
 - secondaria 66
- byte 20

- camera oscura 111
- campanello 61
- campo elettrico 72
- campo magnetico 53 e segg.
 - delle correnti indotte 66, 67
 - di una corrente elettrica 58.
 - rappresentazione grafica del 54
 - terrestre 63
- cannocchiale 125
- cannone elettronico 77
- capacità 75 e segg.
- carica 69
 - elettrica 69
 - magnetica 51
- catodo 76
 - incandescente 76
- cellula solare 26
- cervello 20, 83, 84
- chip 84
- cinpresa 124
- circuito elettrico 25 e segg.
- codice 14
 - a 7 bit 82
 - binario 14
- collegamento in parallelo 39
- collegamento in serie 39

- colori 127
 - complementari 130
 - fondamentali 132
- computer 82 e segg.
 - ottico 84
- condensatore 74
 - come contenitore di energia 74
- conduttore di messa a terra 41
- conduttore elettrico 25
- conduttore ottico 107
- contatto di messa a terra 41
- contenitore a lettura-scrittura 19
- contenitori di dati 19 e segg.
 - CD 20
 - computer 20
 - film 20
 - libro 20
 - videocassetta 20
- corrente alternata 40 e segg.
- corrente di dati 18
- corrente elettrica 25
 - intensità della 27 e segg., 33
 - pericoli della 41
- corto circuito 39
- coulomb 26
- curva caratteristica 37

- dati 9 e segg.
 - elaborazione di 82 e segg.
 - intensità della corrente di 18 e segg.
 - portatore di 10 e segg.
 - ricevitore di 10
 - riduzione di 85 e segg., 135
 - sorgente di 10
 - trasferitori di 11 e segg.
 - trasporto di 9 e segg.
- densità ottica 105
- diagramma di flusso dei dati 11
- diapositive 123
- diffusione 96 e segg.
- dinamo 65
 - di bicicletta 26
- diottria 117
- disco cromatico 128
- disturbo 81
- DNA 21
- domanda sì/no 14

- effettore 83
- elettricità atmosferica 77, 78
- elettricità come portatore di energia 43
- elettrologia 25

elettromagnete 60
elettrone 69
elettroscopio 73
elettrostatica 69
energia 43
- del campo magnetico 57
- intensità della corrente di 43
episcopio 123

farad 76
fattore di amplificazione 80
ferro dolce 50
filtri colorati 98, 129
fissaggio 120
formazine di immagini 109, 114 e segg.
fortuna 89
fuoco 102

generatore 26, 64, 65
- elettrostatico 71
grandangolare 120

immagine 109 e segg.
- riconoscimento di 85
induzione 63 e segg.
influenza elettrostatica 73
internet 18
interruttore automatico 61
interruttore salvavita 39
ione 69
ionosfera 78
isolante elettrico 25

lampada spettrale 134
lampadina a incandescenza 38
lampadina fluorescente 71
lampo 78
laser 100
lavagna luminosa 124
legge di Ohm 37
lente 114 e segg.
- di Fresnel 124
- di ingrandimento 122
linee di campo 55 e segg.
linee di magnetizzazione 51 e segg., 56
luce 93 e segg.
- coerente 100
- diffusa 99
- infrarossa 95
- mescolanza di 95, 127
- monocromatica 99
- peso della 94
- velocità della 93
- tipi di 95
- ultravioletta 95

luminosità 128
lunghezza d'onda 95
lunghezza focale 115

macchina da proiezione 124
macchina fotografica 119
magia 18
magnete 49 e segg.
- permanente 50 e segg.
magnetici dolci 50, 57
magnetici duri 50
magnetizzazione 50, 64
materiali non magnetizzabili 56
memoria di lavoro (RAM) 20, 83
memoria di massa 20
memoria esterna 83
microfono 10
microonde 13
microscopio 125
motore elettrico 62
- curva caratteristica del 37
motore sincrono 62
motorino di avviamento 62

negativo 120
neurone 84
neutrone 69
nitidezza 113
nodo 28
normale al piano 100, 104
nucleo di ferro 59

obiettivo 119
occhiali 122
occhio 121
oculare 125
ohm 38
ologramma 111
onde elettromagnetiche 95
ordine 84
orologio 61
ottica 109

percezione 87
perdite di energia 46
piano focale 115
pixel 132
polo 49
- magnetico 49 e segg.
- negativo 33
- positivo 33
pompa di elettricità 26 e segg.
portatore di carica 69
portatore mobile di carica 70
positivo 120

potenze di due 15
potenziale elettrico 30 e segg., 72
- della Terra 32
potere diottrico 116
prisma 106
probabilità 87
profondità di campo 118
programmi per computer 84
proiettore per diapositive 123
protone 69

quantità di dati 13 e segg.
- di un valore misurato 17
- musica 89
- scrittura 17

radio 18
radiotelescopio 126
registrazione 19
regola dei nodi 28
relais 61, 62, 81
resistenza dei conduttori 46
resistenza elettrica 34, 36 e segg.
resistore 38
rete neurale 84
rete telefonica 19
ridondanza 88
riflessione 96 e segg.
- legge della 100
- totale 107
rifrazione 104 e segg.
ripetitore per telecomunicazioni 80
riproduzione 19
ROM 19, 20
rumore 81

satellite 81
saturazione 128
scala analogica 17
scanner 83

schema elettrico 27
schema elettrico equivalente 46
scintilla 77
sensore 83
sfortuna 89
sistema di lenti 117
spazio dei colori 127 e segg., 132
specchio 101
- parabolico 102
- piano 101
spettro 133 e segg.
spettrometro 134
spinta 30, 33
superconduttore 67, 68
sviluppo 120

telefono 18
teleobiettivo 120, 121
telescopio 126
televisore a colori 77
temporale 78
tensione 30
- alternata 40
- di picco 41
- efficace 41
tonalità cromatica 128 e segg.
transistor 83
trasformatore 41, 65
trasparenza 97
tubo catodico 76

videocamera 11, 124
volt 30
voltmetro 31
Voyager 2, sonda 18

watt 43
wattmetro 45

zero del potenziale 32