CAPITOLO

6

Il campo magnetico

Un ago che si muove accanto a un filo: da quel giorno elettricità e magnetismo non furono più due capitoli separati.

OBIETTIVI

1. Descrivere i magneti, i loro poli e il campo magnetico della Terra, distinguendo il nord geografico dal tipo di polo magnetico.
2. Rappresentare il campo magnetico con le linee di campo e riconoscere che sono chiuse.
3. Spiegare l'esperienza di Oersted e usare la regola della mano destra per il campo di un filo.
4. Calcolare la forza su un filo percorso da corrente, $F = I\,L\,B$ sen θ, e usare il prodotto vettoriale per la sua direzione.
5. Calcolare il campo di un filo rettilineo, di una spira e di un solenoide, e la forza fra due fili paralleli.
6. Spiegare il funzionamento del motore elettrico in corrente continua.

INDICE DEL CAPITOLO

6.1 Magneti e poli magnetici 2
6.2 Il campo magnetico 5
6.3 L'esperienza di Oersted 6
6.4 La forza magnetica su un filo e il tesla 8
6.5 I campi magnetici generati dalle correnti 11
6.6 Forze fra correnti e motore elettrico 17

Fisica 5 · Parte III · Il magnetismo · versione 1.0
Capitolo 6: Il campo magnetico · pagine 167–192 del volume completo · estratto per lo studio

Apri l'app della bussola sul telefono e cammina per la stanza: la freccia ruota per indicare il nord. Dentro il telefono non c'è un ago, ma un sensore grande pochi millimetri che misura un campo invisibile, lo stesso che orienta l'ago delle bussole da più di sette secoli. Avvicina il telefono a un altoparlante o alla calamita di un portachiavi e la freccia impazzisce: il campo della Terra è debole, e un piccolo magnete lo sovrasta senza fatica.

Nei capitoli 1–3 hai visto che fra due cariche c'è un campo elettrico. Qui incontri il secondo campo dell'elettromagnetismo, il *campo magnetico*. I Greci lo conoscevano attraverso una pietra che attira il ferro, e per secoli sembrò un fenomeno a sé; nel 1820 un professore danese vide un ago magnetico muoversi accanto a un filo percorso da corrente. Da allora elettricità e magnetismo sono due facce della stessa fisica, e la corrente dei capitoli 4 e 5 diventa la sorgente dei campi che fanno girare i motori elettrici.

6.1 Magneti e poli magnetici

6.1.1 La pietra di Magnesia

In alcune rocce si trova un minerale nero e pesante, un ossido di ferro, che attira i frammenti di ferro: è la **magnetite**. Un pezzo di magnetite è un **magnete** naturale, o **calamita**; i magneti che usiamo oggi, dalle calamite da frigorifero a quelle degli altoparlanti, sono artificiali, fatti di acciaio o di leghe speciali magnetizzate.

Lucrezio, nel sesto libro del *De rerum natura*, ne ricorda il nome: *quem Magneta vocant patrio de nomine Grai, / Magnetum quia sit patriis in finibus ortus. / hunc homines lapidem mirantur; quippe catenam / saepe ex anellis reddit pendentibus ex se*, «che i Greci chiamano magnete dal nome della sua patria, perché nasce nella terra dei Magneti. Gli uomini si stupiscono di questa pietra: spesso forma una catena di anelli appesi uno all'altro sotto di lei» (VI, 908–911, traduzione della redazione). La stessa catena di anelli è descritta da Platone nello *Ione* (la ritroverai negli esercizi). Plinio il Vecchio (*Naturalis historia*, XXXVI) riferisce invece, citando un autore più antico, la leggenda del pastore Magnete, che sul monte Ida sentì i chiodi delle scarpe e la punta del bastone restare attaccati al terreno: è una leggenda, e la spiegazione geografica di Lucrezio è più probabile.

La catena di anelli è un'osservazione precisa: il ferro vicino a un magnete diventa a sua volta un magnete e attira altro ferro. È la magnetizzazione, che studierai nel capitolo 7.

6.1.2 I poli

Immersa nella limatura di ferro, una calamita a barretta la raccoglie soprattutto alle due estremità: sono i **poli magnetici**, le regioni in cui l'azione è più intensa. Libera di ruotare in un

piano orizzontale, la barretta si dispone sempre con lo stesso polo verso nord: lo si chiama **polo nord** (N), l'altro **polo sud** (S).

Avvicinando due calamite si osserva la regola fondamentale: **poli dello stesso nome si respingono, poli di nome diverso si attraggono**. La somiglianza con le cariche elettriche è evidente, ma c'è una differenza profonda: una carica positiva si separa da una negativa, un polo nord no. Spezzando una calamita a metà si ottengono due calamite più piccole, ciascuna con il suo polo nord e il suo polo sud, e così via fino alle dimensioni degli atomi. Lo aveva già notato nel 1269 Pierre de Maricourt, che nella sua *Epistola de magnete* descrisse i poli, la loro attrazione e repulsione e le calamite spezzate. Un polo magnetico isolato, un *monopolo*, non è mai stato osservato.

6.1.3 La bussola e la Terra

Una **bussola** è un piccolo ago magnetizzato libero di ruotare su un perno: il suo polo nord, di solito colorato, indica il nord. Era in uso nella navigazione europea già nel Medioevo. Perché l'ago si orienta? Rispose il medico inglese William Gilbert nel *De magnete* (1600): costruì una sfera di magnetite, la *terrella*, e vide che un piccolo ago posato sulla sua superficie si comportava come la bussola sulla Terra. La conclusione è nel titolo di un capitolo del primo libro: «il globo della Terra è magnetico, ed è un magnete» (I, 17, traduzione della redazione).

La Terra si comporta, in prima approssimazione, come se al suo interno ci fosse una grande calamita, con l'asse inclinato di una decina di gradi rispetto all'asse di rotazione (Figura 6.1). Poiché il polo nord dell'ago è attratto verso il nord geografico, e poli di nome diverso si attraggono, vicino al nord geografico c'è un polo che si comporta come un polo *sud* magnetico.

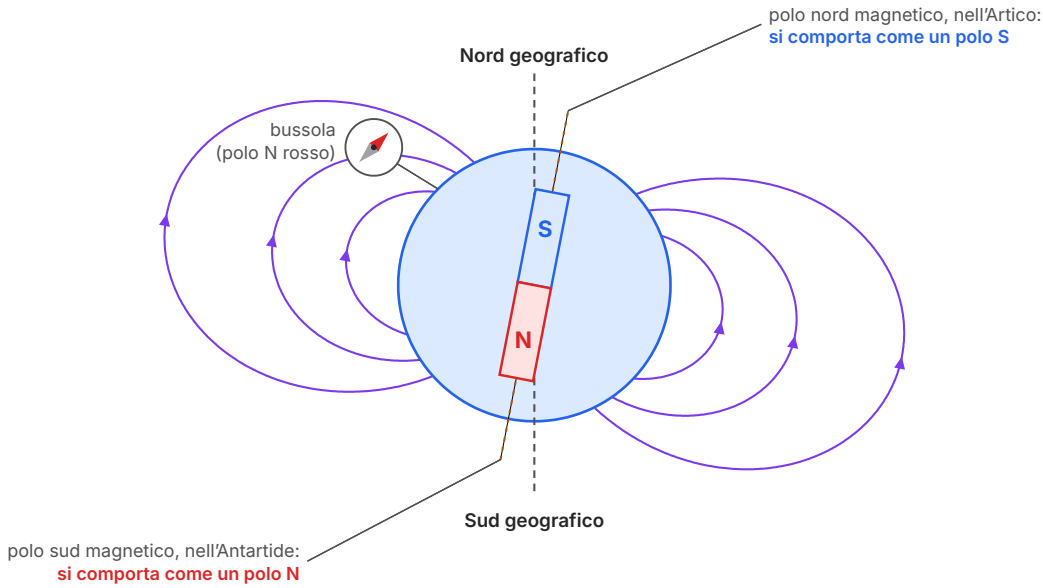


Figura 6.1 La Terra come una grande calamita (schema, non in scala). Le linee del campo magnetico, calcolate per un dipolo, escono dall'emisfero sud e rientrano nell'emisfero nord. Il punto dell'Artico chiamato «polo nord magnetico» si comporta come il polo S di una calamita: per questo attira il polo N dell'ago della bussola. L'asse magnetico è inclinato di una decina di gradi rispetto all'asse di rotazione.

ERRORE FREQUENTE

«Al polo nord c'è un polo nord magnetico»

Il punto dell'Artico verso cui puntano le bussole si chiama, per tradizione geografica, *polo nord magnetico*; ma fisicamente è un polo **sud**, perché attira il polo nord dell'ago. Basta tenere distinto il nome del luogo dal tipo di polo. Inoltre i poli magnetici non coincidono con quelli geografici e non stanno fermi: negli ultimi decenni il polo nord magnetico si è spostato dal Canada verso la Siberia.

Poiché l'asse magnetico è inclinato e il campo terrestre è irregolare, la bussola non indica esattamente il nord geografico: l'angolo fra l'ago e il meridiano geografico è la **declinazione magnetica**, che cambia da luogo a luogo e nel tempo. Un ago libero di ruotare anche in verticale, inoltre, alle nostre latitudini punta il polo nord verso il basso, di oltre 50°: è l'**inclinazione magnetica**, nulla vicino all'equatore magnetico e di 90° ai poli magnetici.

COLLEGAMENTI

Scienze: la memoria magnetica delle rocce

Quando una lava ricca di minerali di ferro si raffredda, i minerali si magnetizzano nella direzione del campo terrestre di quel momento e la conservano: la roccia diventa una bussola fossile. Studiando rocce di età diversa, i geologi hanno scoperto che il campo magnetico terrestre si è **invertito** molte volte, scambiando nord e sud magnetici; l'ultima inversione risale a circa 780 000 anni fa.

Negli anni Sessanta del Novecento si trovarono, ai due lati delle dorsali oceaniche, fasce di roccia magnetizzate alternativamente nei due versi e disposte in modo simmetrico: la lava esce dalla dorsale, si raffredda registrando il campo e si allontana. È una delle prove decisive dell'espansione dei fondali e quindi della tettonica delle placche.

6.2 Il campo magnetico

6.2.1 Dal magnete al campo

Nel capitolo 2 hai visto perché la fisica preferisce il campo all'azione a distanza. Lo stesso linguaggio vale per i magneti: una calamita modifica lo spazio che la circonda, e un ago posto in un punto qualsiasi di questa regione si orienta in una direzione precisa. Diciamo che nella regione c'è un **campo magnetico**, il vettore $\boldsymbol{B}$.

La **direzione e il verso** di $\boldsymbol{B}$ in un punto sono quelli del polo nord di un piccolo ago posto in quel punto: l'ago fa per il campo magnetico ciò che la carica di prova faceva per il campo elettrico. Per l'**intensità** servirà una forza misurabile, che troveremo fra due paragrafi studiando la forza su un filo.

6.2.2 Le linee del campo magnetico

Il campo magnetico si rappresenta con le **linee del campo magnetico**: curve tangenti in ogni punto a $\boldsymbol{B}$, orientate come il polo nord degli aghi, più fitte dove il campo è più intenso. Si possono vedere: sopra una calamita coperta da un cartoncino si sparge limatura di ferro e si batte piano il cartoncino; ogni granello si magnetizza, si allinea con il campo come un minuscolo ago, e la limatura disegna le linee (Figura 6.2).

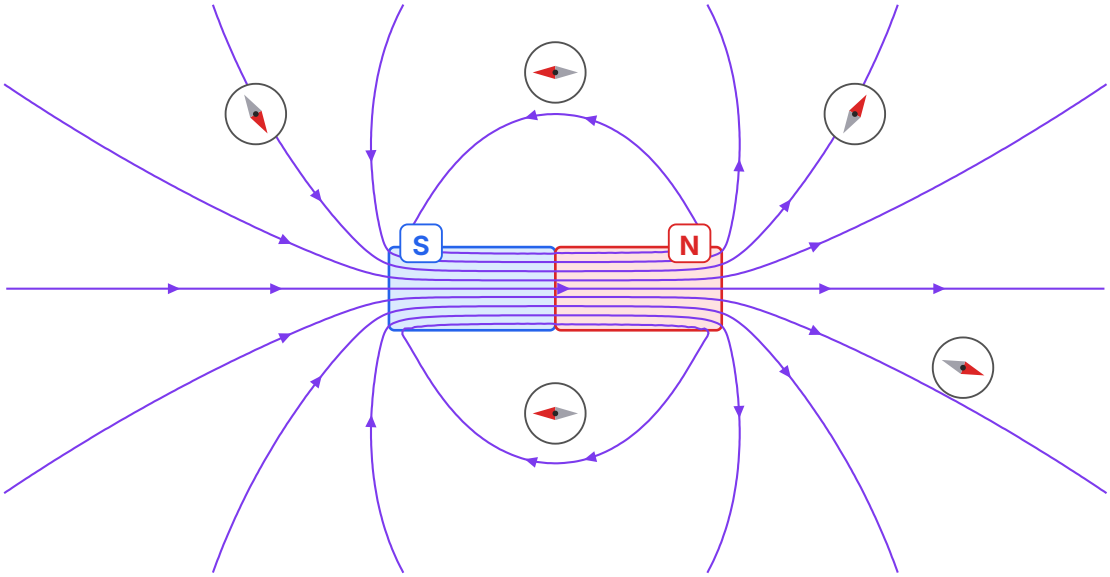


Figura 6.2 Le linee del campo magnetico di una calamita a barretta, calcolate al computer per un magnete cilindrico. Fuori dalla calamita le linee escono dal polo nord e rientrano nel polo sud; dentro proseguono da S verso N, così che ogni linea è chiusa. Gli aghi delle bussole si dispongono tangenti alle linee, con il polo N (rosso) nel verso del campo. Le linee sono più fitte vicino ai poli, dove il campo è più intenso.

Le linee **non si incrociano mai**, perché in ogni punto il campo ha una sola direzione; fuori dalla calamita **escono dal polo nord ed entrano nel polo sud**; e soprattutto **sono chiuse**: dentro la calamita proseguono da S a N e si ricongiungono con se stesse. Qui sta la differenza con il campo elettrico, le cui linee nascono sulle cariche positive e finiscono su quelle negative: le linee magnetiche non hanno né inizio né fine, perché non esistono poli isolati da cui farle partire. Nel capitolo 7 vedrai la ragione microscopica di questo fatto.

Fra i poli affacciati di una calamita a ferro di cavallo, lontano dai bordi, le linee sono rette parallele ed equidistanti: in quella regione il campo ha lo stesso modulo, la stessa direzione e lo stesso verso in ogni punto, ed è un **campo magnetico uniforme**. È l'analogo del campo elettrico uniforme fra le armature di un condensatore piano (capitolo 3), e lo useremo spesso.

6.3 L'esperienza di Oersted

6.3.1 Un ago accanto a un filo

Elettricità e magnetismo hanno molto in comune: due «specie» (cariche positive e negative, poli nord e sud), attrazioni e repulsioni, forze che si indeboliscono con la distanza. Eppure una

carica ferma non ha alcun effetto su un ago magnetico, e per secoli nessuno riuscì a mostrare un legame. La svolta arrivò nel 1820, a Copenaghen, con Hans Christian Oersted.

L'esperienza si rifà facilmente (Figura 6.3). Sopra una bussola si tende un filo di rame *parallelo* all'ago, cioè nella direzione nord-sud. A corrente spenta l'ago punta a nord; quando nel filo passa una corrente di qualche ampere, l'ago **ruota** e si dispone di traverso. Se si inverte la corrente, o si mette la bussola sopra il filo invece che sotto, ruota dalla parte opposta; se si apre il circuito, torna verso nord.

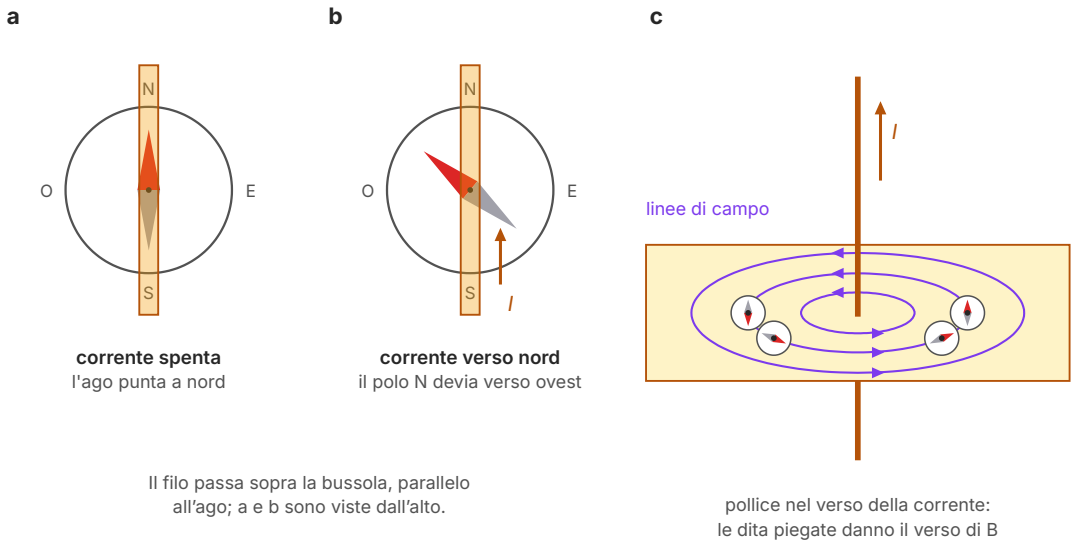


Figura 6.3 L'esperienza di Oersted. **a** e **b**: una bussola vista dall'alto, con un filo teso sopra di essa nella direzione nord-sud. Quando nel filo passa una corrente verso nord, il polo N dell'ago, che si trova sotto il filo, devia verso ovest: il campo del filo, diretto verso ovest sotto il filo, si somma a quello terrestre. **c**: un filo verticale attraversa un cartoncino orizzontale. Le linee del campo sono circonferenze centrate sul filo, percorse in verso antiorario se la corrente sale (visto dall'alto); le bussole sul cartoncino si dispongono tangenti alle circonferenze.

La conclusione è che **una corrente elettrica genera un campo magnetico**. Non una carica ferma, ma una carica in moto: è il movimento delle cariche nel filo a produrre il campo che orienta l'ago. Elettricità e magnetismo, studiati per due millenni come capitoli separati, si scoprivano legati.

6.3.2 Le linee del campo di un filo rettilineo

Se un filo verticale attraversa un cartoncino orizzontale cosparso di limatura di ferro (Figura 6.3c), con una corrente intensa la limatura si dispone in **circonferenze concentriche** attorno al filo, e piccole bussole si orientano tangenti a esse. Le linee del campo di un filo rettilineo sono circonferenze centrate sul filo, in piani perpendicolari al filo, più rade allontanandosi; anche qui sono chiuse, e non c'è nessun polo.

Il verso delle linee si ricava con la **regola della mano destra**: impugnato idealmente il filo con la mano destra, con il pollice nel verso della corrente, le altre dita piegate indicano il verso delle linee. Nella Figura 6.3b la corrente va verso nord: le dita passano sotto il filo andando verso ovest, e proprio verso ovest devia l'ago.

APPROFONDIMENTO

Oersted, la filosofia della natura e un opuscolo in latino

Hans Christian Oersted (1777–1851), professore all'Università di Copenaghen, non si imbatté nel legame del tutto per caso. Si era formato sulla filosofia di Kant ed era vicino alla *Naturphilosophie* romantica tedesca: il filosofo Schelling e il fisico Johann Wilhelm Ritter, suo amico, sostenevano che tutte le forze della natura sono manifestazioni di un'unica attività fondamentale. Se è così, elettricità e magnetismo devono essere collegati. Oersted cercò quel legame per anni, e nel 1820 lo trovò.

Il 21 luglio 1820 diffuse la scoperta con un opuscolo di quattro pagine in latino, la lingua internazionale dei dotti: *Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam*, «Esperimenti sull'effetto del conflitto elettrico sull'ago magnetico». Il «conflitto elettrico» era il suo nome per ciò che accade nel filo percorso da corrente; l'opuscolo notava anche che l'effetto attraversa vetro, legno e acqua interposti fra filo e ago.

La notizia corse per l'Europa. A Parigi, in poche settimane, Ampère scoprì le forze fra due correnti (le vedrai alla fine del capitolo) e Biot e Savart misurarono il campo di un filo; nel 1821, a Londra, Faraday ottenne la rotazione continua di un filo attorno a una calamita, l'antenato del motore elettrico. Un'idea filosofica, messa alla prova da un esperimento, aveva aperto un nuovo capitolo della fisica.

C'è una conseguenza immediata. Se una corrente esercita una forza su un magnete, per il terzo principio della dinamica il magnete deve esercitare una forza uguale e opposta sulla corrente. Un filo percorso da corrente posto vicino a una calamita dovrebbe quindi muoversi: è proprio così, ed è il fenomeno che ci permetterà di misurare il campo magnetico.

6.4 La forza magnetica su un filo e il tesla

6.4.1 Un filo fra i poli di una calamita

Si sospende un tratto di filo rigido, orizzontale, fra i poli di una calamita a ferro di cavallo, dove il campo è uniforme, e si fa passare corrente (Figura 6.4a). Il filo scatta in su o in giù: su di esso agisce una forza. Variando una grandezza alla volta, con una bilancia si misura che la forza:

- è **proporzionale all'intensità di corrente** I, e cambia verso se si inverte la corrente;
- è **proporzionale alla lunghezza** L del tratto di filo immerso nel campo;

- dipende dall'**angolo** θ fra il filo e il campo: è massima quando il filo è perpendicolare alle linee del campo, nulla quando il filo è parallelo;
- è sempre **perpendicolare sia al filo sia al campo**: non spinge il filo lungo le linee del campo, ma di traverso.

Le prime tre osservazioni si riassumono in una formula. Il modulo della forza è

$$F = I\,L\,B\,\text{sen}\,\theta$$

dove B è il modulo del campo magnetico. La quarta osservazione riguarda la direzione, e richiede un'operazione fra vettori che non hai ancora incontrato in matematica: il prodotto vettoriale.

DA RICORDARE

Strumenti matematici: il prodotto vettoriale

Dati due vettori $\boldsymbol{a}$ e $\boldsymbol{b}$ che formano un angolo θ, il loro **prodotto vettoriale** $\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b}$ (si legge «a vettore b») è un *vettore*, a differenza del prodotto scalare che è un numero. Ecco come è fatto (Figura 6.4b):

- il **modulo** è $a\,b\,\text{sen}\,\theta$, cioè l'area del parallelogramma che ha per lati i due vettori;
- la **direzione** è perpendicolare al piano che contiene $\boldsymbol{a}$ e $\boldsymbol{b}$;
- il **verso** si trova con la regola della mano destra: piega le dita della mano destra da $\boldsymbol{a}$ verso $\boldsymbol{b}$, per l'angolo più piccolo fra i due; il pollice teso indica il verso di $\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b}$.

Due conseguenze. Il prodotto vettoriale di due vettori **paralleli** (o opposti) è **nullo**, perché $\text{sen}\,0° = \text{sen}\,180° = 0$; è massimo, $a\,b$, per vettori perpendicolari. E l'ordine conta: $\boldsymbol{b} \times \boldsymbol{a} = -\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b}$, perché piegando le dita da $\boldsymbol{b}$ verso $\boldsymbol{a}$ il pollice si rovescia. In questo volume il prodotto vettoriale serve soltanto per la forza magnetica: ne userai il modulo e la regola della mano destra, mai le componenti.

Con il prodotto vettoriale la forza sul filo si scrive in una sola formula, che contiene modulo, direzione e verso:

$$\boldsymbol{F} = I\boldsymbol{L} \times \boldsymbol{B}$$

dove $\boldsymbol{L}$ è un vettore lungo quanto il tratto di filo, diretto lungo il filo e orientato nel verso della corrente. Verifichiamola sulla Figura 6.4a: $\boldsymbol{L}$ esce dal foglio, $\boldsymbol{B}$ va da sinistra a destra; piegando le dita della mano destra dalla direzione uscente verso destra, il pollice punta in alto. La forza spinge il filo verso l'alto, come si osserva.

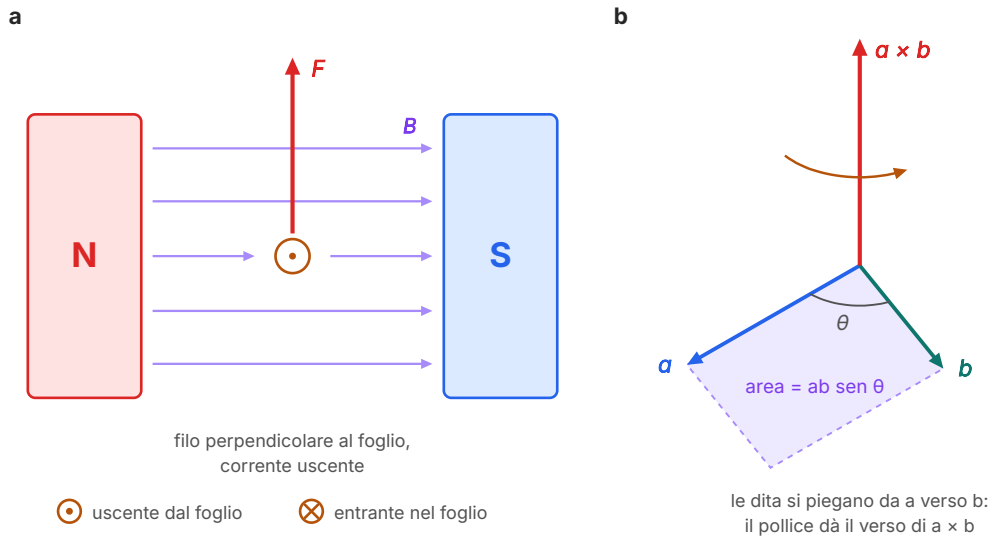


Figura 6.4 **a**: un filo perpendicolare al foglio, percorso da una corrente uscente, nel campo uniforme fra due poli. La forza $\boldsymbol{F} = I\,\boldsymbol{L} \times \boldsymbol{B}$ è perpendicolare sia al filo sia al campo: qui spinge il filo verso l'alto. **b**: il prodotto vettoriale. Il modulo di $\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b}$ è l'area del parallelogramma, $a\,b$ sen θ; il verso è dato dal pollice della mano destra quando le dita si piegano da $\boldsymbol{a}$ verso $\boldsymbol{b}$.

6.4.2 Come si misura il campo: il tesla

La forza sul filo permette di definire l'intensità del campo, come la forza su una carica di prova aveva definito E. Si dispone il filo perpendicolare al campo, in modo che la forza sia massima, e si misura: il modulo del campo magnetico è

$$B = \frac{F}{I\,L}$$

cioè la forza per unità di corrente e per unità di lunghezza su un filo perpendicolare al campo. Nel Sistema Internazionale il campo magnetico si misura in **tesla** (T), in onore dell'inventore Nikola Tesla: un campo di 1 tesla esercita una forza di 1 N su un filo lungo 1 m, perpendicolare al campo, percorso da una corrente di 1 A.

$$1\ \mathrm{T} = 1\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A}\cdot\mathrm{m}}$$

Il tesla è un'unità grande. La Tabella 6.1 raccoglie alcuni ordini di grandezza: il campo della Terra è di qualche decina di microtesla ($1\ \mu\mathrm{T} = 10^{-6}$ T), mentre i campi di qualche tesla si ottengono soltanto con grandi elettromagneti.

Tabella 6.1 Ordini di grandezza di alcuni campi magnetici. I valori sono indicativi: il campo di una calamita, per esempio, diminuisce rapidamente allontanandosi dalla sua superficie.

Sorgente	B (T)
campo magnetico terrestre, in Italia	5×10^{-5}
a 2 cm da un filo con una corrente di 10 A (calcolato più avanti)	1×10^{-4}
calamita da frigorifero, a contatto	10^{-2}
apparecchio per la risonanza magnetica (ospedale)	1,5–3

ESEMPIO SVOLTO

Un filo sostenuto dalla forza magnetica

Problema. Una barretta di rame orizzontale, lunga 20 cm e di massa 12 g, è appoggiata su due contatti in un campo magnetico uniforme orizzontale di 0,30 T, perpendicolare alla barretta. Quale corrente deve passare nella barretta perché la forza magnetica ne equilibri il peso? In che verso, se il campo è diretto verso nord e la barretta è orientata est-ovest?

Equilibrio. La forza magnetica deve essere verticale verso l'alto e uguale al peso: $I\,L\,B = m\,g$, con $\operatorname{sen} 90° = 1$. Quindi

$$I = \frac{m\,g}{B\,L} = \frac{0{,}012\ \text{kg} \cdot 9{,}8\ \text{m/s}^2}{0{,}30\ \text{T} \cdot 0{,}20\ \text{m}} \approx 2{,}0\ \text{A}$$

Verso. Serve $I\,\boldsymbol{L} \times \boldsymbol{B}$ verso l'alto, con $\boldsymbol{B}$ verso nord. Se la corrente va verso est, piegando le dita della mano destra da est verso nord il pollice punta in alto: va bene. Con la corrente verso ovest la forza spingerebbe la barretta contro i contatti.

Controllo. Unità: $\text{kg} \cdot \text{m/s}^2 / (\text{T} \cdot \text{m}) = \text{N} / (\text{N/(A·m)} \cdot \text{m}) = \text{A}$. Una corrente di 2 A è comune in laboratorio, ma il campo di 0,30 T è quello di una buona calamita: con il solo campo terrestre, circa 6000 volte più debole, servirebbero più di 10 000 A.

6.5 I campi magnetici generati dalle correnti

6.5.1 Il filo rettilineo

Oersted aveva visto che il campo di un filo è fatto di circonferenze. Quanto vale? Nell'autunno del 1820 Biot e Savart misurarono, con un ago oscillante, come il campo di un lungo filo rettilineo dipende dalla corrente e dalla distanza. Il risultato, che chiamiamo **legge di Biot–Savart** per il filo rettilineo, è

$$B = \frac{\mu_0\,I}{2\pi\,r}$$

dove r è la distanza dal filo e μ_0 è una costante universale, la **permeabilità magnetica del vuoto**, che negli esercizi useremo con il valore $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ T·m/A $\approx 1{,}26 \times 10^{-6}$ T·m/A (Tabella A.1 dell'Appendice). Il campo è proporzionale alla corrente e **inversamente proporzionale alla distanza**: a distanza doppia è la metà, non un quarto come la forza di Coulomb. La formula vale per un filo molto lungo rispetto alla distanza r, e in aria come nel vuoto.

Per una corrente di 10 A, a 2,0 cm dal filo: $B = 4\pi \times 10^{-7} \cdot 10 \,/\, (2\pi \cdot 0{,}020)$ T $= 1{,}0 \times 10^{-4}$ T, il doppio del campo terrestre. È il valore della Tabella 6.1, e spiega perché Oersted vide l'ago muoversi: vicino a un filo con qualche ampere il campo della corrente è paragonabile a quello della Terra.

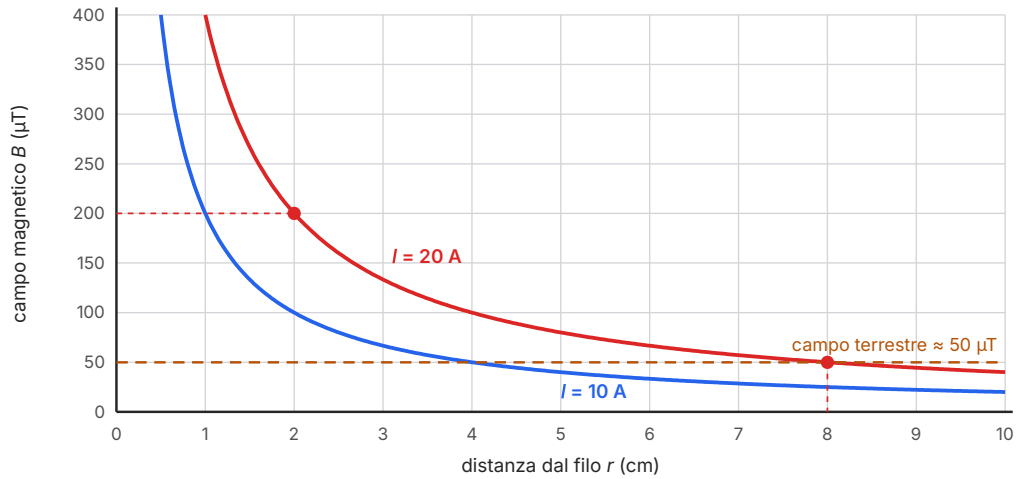


Figura 6.5 Il campo magnetico di un lungo filo rettilineo in funzione della distanza, $B = \mu_0 I/(2\pi r)$, calcolato per due correnti. Il campo è inversamente proporzionale alla distanza: il prodotto $B \cdot r$ è lo stesso in ogni punto della stessa curva. La linea tratteggiata indica l'ordine di grandezza del campo terrestre; i punti rossi sono quelli dell'esempio svolto.

ESEMPIO SVOLTO

Leggere un grafico: quando il filo disturba la bussola

Problema. Nella Figura 6.5 la curva rossa è il campo di un filo con $I = 20$ A. a) Leggi il campo a 2 cm dal filo e controllalo con la formula. b) Verifica che la curva sia un'iperbole del tipo $B \cdot r =$ costante. c) A quale distanza il campo del filo scende al livello del campo terrestre, 50 μT?

a) Sul grafico, a 2 cm la curva rossa passa per 200 μT. Con la formula: $B = 4\pi \times 10^{-7} \cdot 20 / (2\pi \cdot 0{,}020)$ T $= 2{,}0 \times 10^{-4}$ T $= 200$ μT.

b) Il prodotto vale 200 μT · 2 cm = 400 μT·cm. A 4 cm il grafico dà 100 μT, a 8 cm 50 μT: in entrambi i casi il prodotto è ancora 400 μT·cm. Raddoppiando la distanza il campo si dimezza.

c) Sul grafico la curva rossa incontra la retta tratteggiata a 8 cm. Con la formula, $r = \mu_0 I/(2\pi B) = 4\pi \times 10^{-7} \cdot 20 / (2\pi \cdot 5{,}0 \times 10^{-5})$ m $= 0{,}080$ m.

Osservazione. Entro una decina di centimetri da un cavo con 20 A di corrente continua una bussola è inaffidabile: per questo sulle navi le bussole magnetiche si montano lontano dai cavi elettrici.

6.5.2 La spira circolare

Un filo piegato a forma di circonferenza è una **spira**. Ogni tratto della spira produce attorno a sé linee circolari, e al centro della spira i contributi di tutti i tratti hanno la stessa direzione, perpendicolare al piano della spira, e si sommano (Figura 6.6a). Per una spira di raggio R il campo al centro vale

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

Per $I = 10$ A e $R = 5{,}0$ cm si ottiene $B = 4\pi \times 10^{-7} \cdot 10 / (2 \cdot 0{,}050)$ T $\approx 1{,}3 \times 10^{-4}$ T. Le linee della spira ricordano quelle di una calamita molto corta: una spira percorsa da corrente si comporta come una calamita piatta, con una faccia nord e una faccia sud. Piegando le dita della mano destra nel verso della corrente lungo la spira, il pollice indica il verso del campo al centro, cioè la faccia nord.

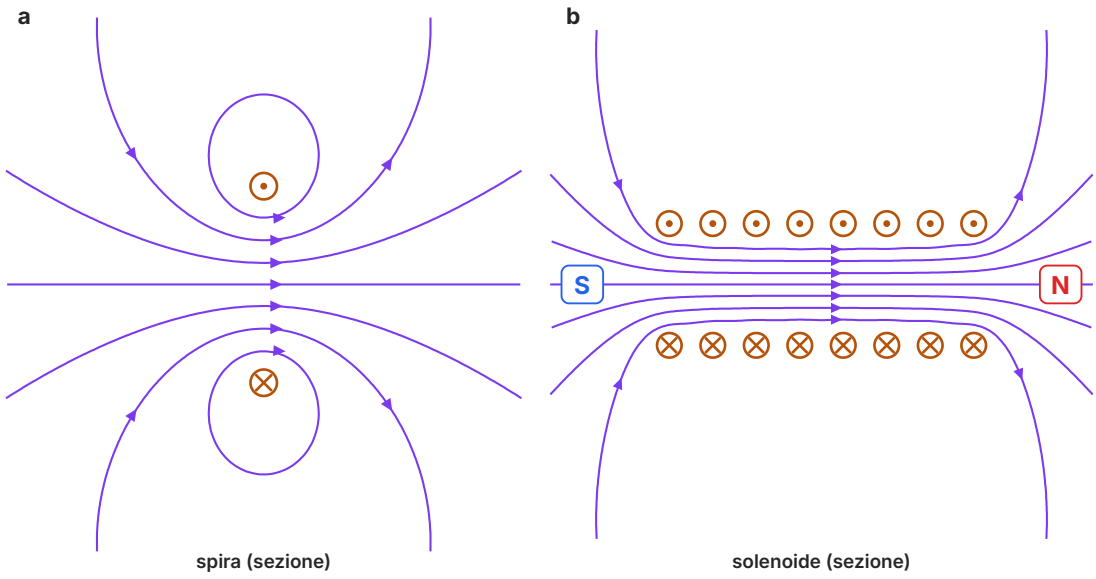


Figura 6.6 Le linee del campo magnetico, calcolate al computer, in una sezione che taglia a metà **a** una spira circolare e **b** un solenoide di otto spire. I simboli indicano la corrente uscente dal foglio (⊙) ed entrante (⊗). Dentro il solenoide le linee sono quasi parallele ed equidistanti: il campo è praticamente uniforme. Fuori, il campo è debole e ha la forma di quello di una calamita a barretta, con il polo nord dalla parte da cui escono le linee.

6.5.3 Il solenoide

Avvolgendo un filo ad elica, con molte spire vicine, si ottiene un **solenoide**. I campi delle spire si sommano: all'interno, lontano dalle estremità, le linee diventano rette parallele ed equidistanti, e il campo è **uniforme**; all'esterno i contributi delle spire quasi si cancellano, e il campo è debole (Figura 6.6b). Per un solenoide lungo rispetto al suo diametro, con N spire su una lunghezza L, il campo interno vale

$$B = \frac{\mu_0 N I}{L}$$

Il campo non dipende dal raggio né dal punto all'interno, ma soltanto dal numero di spire per unità di lunghezza, N/L, e dalla corrente. Un solenoide lungo 25 cm, con 500 spire e 2,0 A, ha all'interno $B = 4\pi \times 10^{-7} \cdot 500 \cdot 2{,}0 \,/\, 0{,}25\ \text{T} \approx 5{,}0 \times 10^{-3}$ T, circa cento volte il campo terrestre. Fuori, le linee sono quelle di una calamita a barretta (confronta la Figura 6.6b con la Figura 6.2): un solenoide è una calamita che si accende e si spegne con un interruttore.

Se nel solenoide si infila un nucleo di ferro, il campo aumenta moltissimo, di centinaia o anche migliaia di volte, perché il ferro si magnetizza (capitolo 7). Si ottiene un **elettromagnete**, il primo dei quali fu costruito da William Sturgeon nel 1825. Gli elettromagneti sono ovunque:

nelle gru che sollevano rottami di ferro, nei relè, nelle serrature elettriche, negli interruttori magnetotermici del capitolo 5 e, con avvolgimenti superconduttori, negli apparecchi per la risonanza magnetica.

COLLEGAMENTI

Storia: il telegrafo, la prima rete elettrica

La prima grande applicazione dell'elettromagnete fu il telegrafo. Nel ricevitore una corrente, inviata da lontano lungo un filo, accende un elettromagnete che attira una levetta di ferro; aprendo e chiudendo il circuito con un tasto si trasmettono impulsi brevi e lunghi, i punti e le linee dell'alfabeto Morse. Nel 1844 Samuel Morse inaugurò la linea fra Washington e Baltimora; nel 1866 entrò in servizio un cavo telegrafico stabile attraverso l'Atlantico.

Le linee telegrafiche accompagnarono le ferrovie e collegarono capitali, borse e giornali: una notizia attraversava un continente in pochi minuti. È uno dei volti della seconda rivoluzione industriale che studi in storia.

COLLEGAMENTI

In laboratorio: il campo di un solenoide e la costante μ_0

Materiali. Un solenoide di 400 spire su un tubo di plastica lungo $L = (0{,}200 \pm 0{,}001)$ m, di raggio 2,0 cm; un alimentatore in corrente continua a bassa tensione; un amperometro (sensibilità 0,01 A); una sonda di Hall collegata a un sistema di acquisizione (risoluzione 0,01 mT), che dà una tensione proporzionale al campo (capitolo 7).

Procedimento. A corrente spenta porta la sonda al centro del solenoide, orientata in modo da misurare il campo lungo l'asse, e azzera la lettura: togli così il campo terrestre e quelli dell'ambiente. Fai passare correnti da 0,50 A a 2,50 A e leggi ogni volta il campo, tenendo la corrente accesa solo per il tempo della lettura.

Tabella 6.2 Il campo al centro di un solenoide ($N = 400$, $L = 0{,}200$ m) in funzione della corrente (dati tipici). Incertezze: ± 0,01 A sulla corrente, ± 0,02 mT sul campo.

I (A)	B (mT)	B/I (mT/A)
0,50	1,23	2,46
1,00	2,48	2,48
1,50	3,70	2,47
2,00	4,94	2,47
2,50	6,17	2,47

Che cosa concludere. Il rapporto B/I è costante entro le incertezze: il campo è proporzionale alla corrente, e in un grafico B–I i punti stanno su una retta per l'origine con pendenza 2,47 mT/A. Poiché $B = \mu_0(N/L)I$, la pendenza è $\mu_0 N/L$, con $N/L = 2000$ spire/m. Si ricava $\mu_0 = 2{,}469 \times 10^{-3} / 2000$ T·m/A $= (1{,}23 \pm 0{,}01) \times 10^{-6}$ T·m/A. Il valore è circa il 2% più piccolo di quello della Tabella A.1, $1{,}26 \times 10^{-6}$ T·m/A, e la differenza è maggiore dell'incertezza: c'è un effetto sistematico. È la lunghezza finita del solenoide. La formula vale per un solenoide infinitamente lungo; per uno lungo 20 cm e di raggio 2 cm la teoria prevede al centro un campo circa il 2% più debole, e con questa correzione l'accordo è completo.

Sicurezza. Solo l'alimentatore a bassa tensione, mai la rete elettrica; non superare la corrente indicata sul solenoide, che dopo una misura lunga può essere caldo. Tieni lontane carte magnetiche e orologi meccanici.

Per la relazione. Segui lo schema di Fisica 3, capitolo 4: tabella con le incertezze, grafico B–I con le barre d'errore e la retta per l'origine, pendenza e μ_0, confronto con il valore tabulato e discussione dell'effetto sistematico.

6.6 Forze fra correnti e motore elettrico

6.6.1 Due fili paralleli

Pochi giorni dopo aver visto a Parigi l'esperienza di Oersted, nel settembre 1820, Ampère fece un passo ulteriore: se una corrente produce un campo magnetico, e un campo magnetico agisce su una corrente, allora due correnti devono esercitare forze l'una sull'altra, senza bisogno di alcuna calamita. Lo verificò con due fili paralleli: **se le correnti hanno lo stesso verso i fili si attraggono, se hanno versi opposti si respingono** (Figura 6.7). Per una volta la regola è rovesciata rispetto alle cariche: le correnti «simili» si attraggono.

La forza si calcola mettendo insieme le due leggi di questo capitolo. Il filo 1, con corrente I_1, produce alla distanza d, dove si trova il filo 2, un campo $B_1 = \mu_0 I_1/(2\pi d)$, perpendicolare al filo 2. Su un tratto lungo L del filo 2 agisce quindi la forza $F = I_2 L\, B_1$, cioè

$$\frac{F}{L} = \frac{\mu_0\, I_1\, I_2}{2\pi\, d}$$

La formula è simmetrica: il filo 1 attira il filo 2 con la stessa forza con cui il filo 2 attira il filo 1, come vuole il terzo principio. Due fili con 10 A ciascuno, a 5,0 cm di distanza, si attraggono con $4\pi \times 10^{-7} \cdot 10 \cdot 10 \,/\, (2\pi \cdot 0{,}050)$ N/m = $4{,}0 \times 10^{-4}$ N per metro: poco, ma la forza cresce con il prodotto delle correnti: nelle sbarre delle centrali elettriche, con migliaia di ampere, è decine di migliaia di volte maggiore.

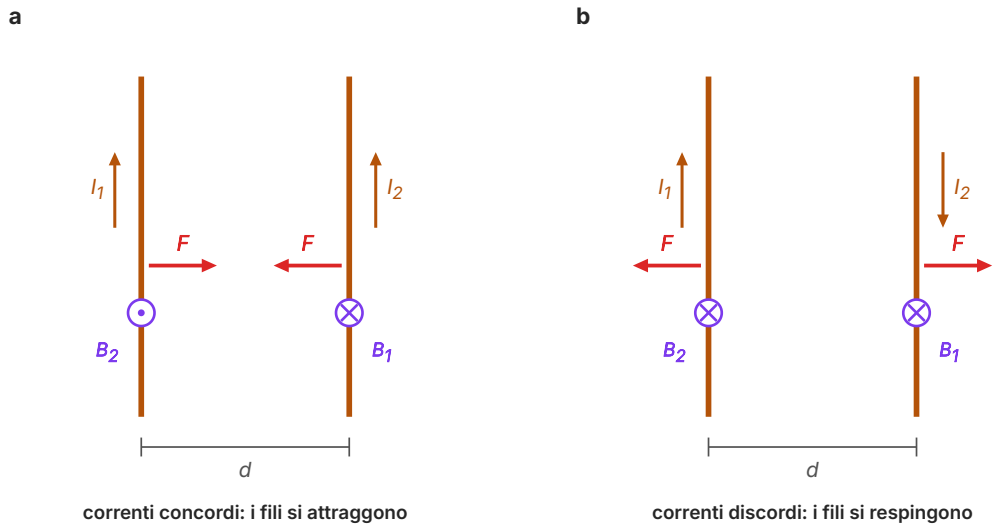


Figura 6.7 Forze fra due fili paralleli. **a**: correnti concordi. Il campo $\boldsymbol{B}_1$ del filo 1 nel punto in cui si trova il filo 2 entra nel foglio, e la forza $I_2\boldsymbol{L} \times \boldsymbol{B}_1$ spinge il filo 2 verso il filo 1; allo stesso modo il filo 1 è spinto verso il filo 2. **b**: correnti discordi, i fili si respingono. In entrambi i casi le due forze sono uguali e opposte.

Questa forza è servita anche a definire le unità. Dal 1948 al 2019 l'ampere era la corrente che, in due fili rettilinei paralleli molto lunghi posti a 1 m di distanza nel vuoto, produce una forza di 2×10^{-7} N per ogni metro di lunghezza; così μ_0 valeva esattamente $4\pi \times 10^{-7}$ T·m/A. Dal 2019 l'ampere è definito fissando la carica elementare (capitolo 4), e μ_0 è una grandezza misurata, uguale a $4\pi \times 10^{-7}$ T·m/A entro meno di una parte su un miliardo.

6.6.2 Una spira in un campo magnetico

DA RICORDARE

Dal volume del terzo anno: il momento di una coppia

Due forze di uguale modulo F, parallele e di verso opposto, che non agiscono sulla stessa retta formano una coppia di forze: la loro risultante è zero, ma fanno ruotare il corpo. Il momento della coppia è $M = F\,d$, dove d, il braccio della coppia, è la distanza fra le rette d'azione delle due forze; si misura in N·m (Fisica 3, capitolo 8).

Mettiamo ora una spira rettangolare, libera di ruotare attorno a un asse, nel campo uniforme fra i poli di una calamita (Figura 6.8). Sui due lati paralleli all'asse, lunghi L e perpendicolari al campo, la corrente scorre in versi opposti: le forze hanno modulo $I\,L\,B$ e versi opposti, e formano una coppia. Con il piano della spira parallelo al campo il braccio è la larghezza d della spira

e il momento è massimo, $M = I\,L\,B\,d$ (con N spire, N volte di più). Ruotando, il braccio diminuisce; con il piano perpendicolare al campo le due forze stanno sulla stessa retta e il momento è nullo.

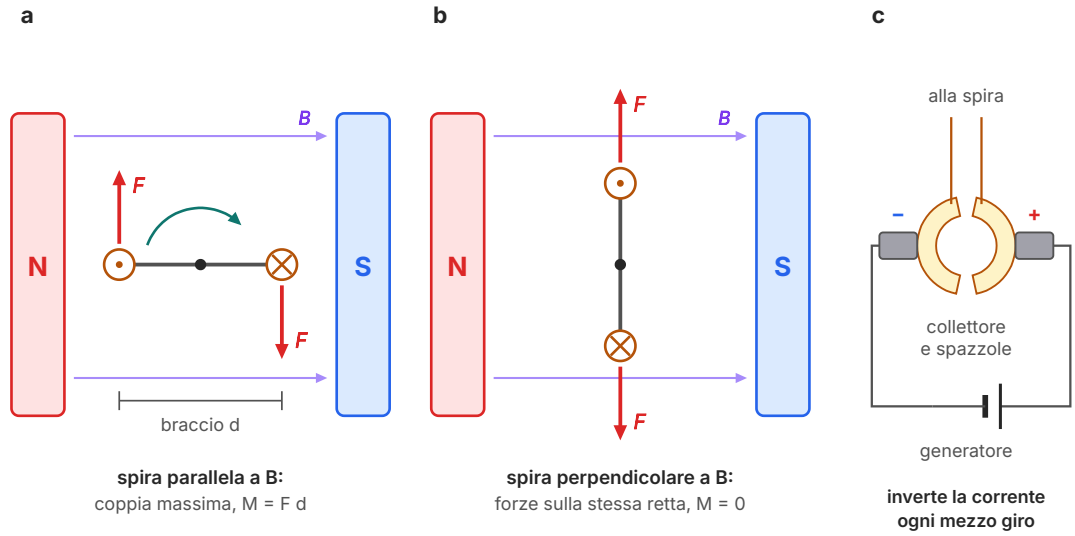


Figura 6.8 Il principio del motore elettrico in corrente continua, visto lungo l'asse di rotazione. **a**: con il piano della spira parallelo al campo, le forze sui due lati formano una coppia di braccio *d* e la spira ruota (qui in verso orario). **b**: con il piano perpendicolare al campo le forze stanno sulla stessa retta e il momento è nullo. **c**: il collettore, un anello diviso in due metà, e le spazzole fisse che lo toccano: a ogni mezzo giro scambiano i collegamenti e invertono la corrente nella spira.

6.6.3 Il motore elettrico in corrente continua

Per una rotazione continua basta un accorgimento. Quando la spira supera per inerzia la posizione di momento nullo, la coppia tenderebbe a riportarla indietro; se proprio allora si inverte la corrente, si invertono le forze e la rotazione prosegue nello stesso verso. Lo fa il **collettore** (o commutatore): un anello di rame diviso in due metà isolate, collegate ai capi della spira, sul quale strisciano due contatti fissi collegati al generatore, le **spazzole**. A ogni mezzo giro ogni spazzola passa sull'altra metà dell'anello e la corrente nella spira si inverte.

È il **motore elettrico in corrente continua**, che trasforma energia elettrica in energia meccanica di rotazione. Nei motori reali le spire sono molte, avvolte su un nucleo di ferro e disposte ad angoli diversi, così che il momento non si annulla mai. Motori di questo tipo fanno girare trapani a batteria, ventole dei computer e giocattoli; i grandi motori di fabbriche e treni usano la corrente alternata del capitolo 9.

Se la spira, invece di girare liberamente, è trattenuta da una molla a spirale, ruota di un angolo tanto maggiore quanto più grande è la corrente, finché il momento della molla equilibra quello magnetico. Con un indice e una scala si ottiene un **galvanometro**, lo strumento che rive-

la e misura correnti piccole: è il cuore degli amperometri e dei voltmetri analogici del capitolo 4.

COLLEGAMENTI

Le parole della fisica

Magnete viene dal greco Μαγνῆτις λίθος, «pietra di Magnesia», la pietra della terra dei Magneti, come spiega Lucrezio; ne deriva il latino *magnes, magnetis*. Dalla stessa parola vengono *magnetismo*, *magnetite* e *elettromagnete*.

Polo è il greco πόλος, «perno»: per gli astronomi greci era il perno attorno a cui ruota la volta celeste. Il nome passò ai poli della Terra, gli estremi dell'asse di rotazione, e da questi ai poli della calamita, che si rivolgono verso di loro.

Solenoide è un termine coniato da Ampère sul greco σωλήν, «tubo, canale», e εἶδος, «forma»: un avvolgimento «a forma di tubo». Lo stesso suffisso *-oide* si ritrova in *sferoide* e *ellissoide*.

Bussola viene dal latino tardo *buxida*, a sua volta dal greco πυξίς, «scatoletta», propriamente di legno di bosso (πύξος, in latino *buxus*): la bussola era la scatoletta che custodiva l'ago. Dalla stessa origine viene *bossolo*, «piccolo contenitore».

IN SINTESI

Le formule del capitolo e il loro significato

Forza su un filo: $\boldsymbol{F} = I\,\boldsymbol{L} \times \boldsymbol{B}$, di modulo $F = I\,L\,B \operatorname{sen}\theta$: perpendicolare al filo e al campo, massima per il filo perpendicolare al campo, nulla per il filo parallelo. F in N, I in A, L in m, B in T.

Definizione del campo magnetico: $B = F/(I\,L)$ per un filo perpendicolare al campo; 1 T = 1 N/(A·m). Direzione e verso: quelli indicati dal polo nord di un ago magnetico.

Prodotto vettoriale: $|\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b}| = a\,b \operatorname{sen}\theta$; direzione perpendicolare ai due vettori, verso dato dalla regola della mano destra; nullo per vettori paralleli.

Filo rettilineo (legge di Biot–Savart): $B = \mu_0 I/(2\pi r)$: linee circolari attorno al filo, verso dato dalla mano destra; il campo è inversamente proporzionale alla distanza. $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ T·m/A.

Centro di una spira: $B = \mu_0 I/(2R)$, perpendicolare al piano della spira.

Solenoide: $B = \mu_0 N\,I/L$, uniforme all'interno e indipendente dal raggio; fuori, il campo di una calamita a barretta.

Forza fra due fili paralleli: $F/L = \mu_0 I_1 I_2/(2\pi d)$, in N/m: attrattiva per correnti concordi, repulsiva per correnti discordi.

Momento su una spira: le forze sui due lati formano una coppia, $M = F\,d$; massimo con il piano della spira parallelo al campo, nullo con il piano perpendicolare.

Il campo magnetico ha due sorgenti, le calamite e le correnti, e il capitolo 7 mostrerà che in realtà ne ha una sola: anche dentro una calamita ci sono cariche in moto. Lì vedrai anche come

il campo agisce su una singola carica che si muove, dalla particella in un acceleratore agli elettroni del vento solare che accendono le aurore polari.

SINTESI

- I magneti hanno due poli, nord e sud: poli dello stesso nome si respingono, di nome diverso si attraggono. Spezzando una calamita si ottengono due calamite complete; un polo isolato non è mai stato osservato.
- La Terra si comporta come una grande calamita (Gilbert, 1600). Vicino al nord geografico c'è un polo che si comporta come un polo sud magnetico; l'asse magnetico è inclinato rispetto a quello di rotazione e i poli magnetici si spostano nel tempo.
- Il campo magnetico $\boldsymbol{B}$ ha in ogni punto la direzione e il verso indicati dal polo nord di un ago magnetico. Le linee del campo sono chiuse: fuori da una calamita vanno da N a S, dentro da S a N.
- Oersted (1820) scoprì che una corrente elettrica genera un campo magnetico. Le linee del campo di un filo rettilineo sono circonferenze centrate sul filo, orientate secondo la regola della mano destra.
- Un filo percorso da corrente in un campo magnetico subisce la forza $\boldsymbol{F} = I\,\boldsymbol{L} \times \boldsymbol{B}$, di modulo $I\,L\,B$ sen θ, perpendicolare al filo e al campo.
- Il prodotto vettoriale di due vettori ha modulo $a\,b$ sen θ, direzione perpendicolare a entrambi e verso dato dalla regola della mano destra; è nullo per vettori paralleli.
- Il modulo del campo si definisce con la forza su un filo perpendicolare al campo, $B = F/(I\,L)$, e si misura in tesla: 1 T = 1 N/(A·m). Il campo terrestre è di circa 5×10^{-5} T.
- Il campo di un filo rettilineo è $B = \mu_0 I/(2\pi r)$, inversamente proporzionale alla distanza; al centro di una spira $B = \mu_0 I/(2R)$.
- Dentro un solenoide lungo il campo è uniforme, $B = \mu_0 N\,I/L$; fuori è simile a quello di una calamita a barretta. Con un nucleo di ferro si ottiene un elettromagnete.
- Due fili paralleli si attraggono se le correnti sono concordi e si respingono se sono discordi, con $F/L = \mu_0 I_1 I_2/(2\pi d)$ (Ampère, 1820).
- Su una spira in un campo magnetico agisce una coppia di forze. Nel motore in corrente continua il collettore inverte la corrente a ogni mezzo giro e la rotazione continua; trattenuta da una molla, la spira diventa un galvanometro.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Spezzando a metà una calamita a barretta si ottengono:
   A. un polo nord e un polo sud separati
   B. due calamite, ciascuna con un polo nord e un polo sud
   C. due pezzi di ferro non magnetizzati
   D. due poli nord, perché il taglio crea un nuovo polo uguale

2. ● Il polo nord dell'ago di una bussola indica il nord geografico perché vicino al nord geografico c'è:
   A. un polo nord magnetico, che attira i poli nord
   B. un grande giacimento di magnetite
   C. un polo che si comporta come un polo sud magnetico
   D. l'asse di rotazione della Terra, che attira il ferro

3. ● L'esperienza di Oersted (1820) dimostrò che:
   A. una corrente elettrica genera un campo magnetico
   B. una carica elettrica ferma attira un ago magnetico
   C. il campo magnetico terrestre si inverte nel tempo
   D. una calamita in movimento genera una corrente in un filo

4. ● Un filo rettilineo percorso da corrente è parallelo alle linee di un campo magnetico uniforme. La forza magnetica sul filo è:
   A. massima
   B. diretta come il campo
   C. uguale a metà del valore massimo
   D. nulla

5. ● Il tesla, unità di misura del campo magnetico, equivale a:
   A. $N \cdot A/m$
   B. $N/(A \cdot m)$
   C. $A \cdot m/N$
   D. $N \cdot m/A$

6. ●● Raddoppiando la distanza da un lungo filo rettilineo percorso da corrente, il campo magnetico:
   A. diventa un quarto
   B. raddoppia
   C. si dimezza
   D. resta uguale

7. ●● In un solenoide si raddoppia il numero di spire, lasciando uguali la lunghezza e la corrente. Il campo interno:
   A. si dimezza
   B. resta uguale
   C. quadruplica
   D. raddoppia

Vero o falso

8. ● Fuori da una calamita le linee del campo magnetico escono dal polo nord ed entrano nel polo sud. V / F

9. ● Due fili paralleli percorsi da correnti nello stesso verso si respingono. V / F

10. ● Il campo magnetico all'interno di un solenoide lungo è praticamente uniforme. V / F

11. ●● La forza magnetica su un filo percorso da corrente può essere parallela al campo magnetico, se il filo è disposto in modo opportuno. V / F

12. ●● Il campo di un apparecchio per la risonanza magnetica da 1,5 T è circa trentamila volte il campo magnetico terrestre in Italia. V / F

Applicare

13. ● Esprimi in tesla, in millitesla o in microtesla come richiesto: a) 50 μT in T; b) 0,012 T in mT; c) $3{,}0 \times 10^{-4}$ T in μT.

14. ● Un tratto di filo lungo 0,40 m, percorso da una corrente di 5,0 A, è perpendicolare a un campo magnetico uniforme di 0,080 T. Calcola il modulo della forza sul filo.

15. ●● Un filo lungo 25 cm, percorso da una corrente di 4,0 A, forma un angolo di 40° con le linee di un campo uniforme di 0,50 T. Calcola la forza sul filo. Per quale angolo la forza sarebbe massima, e quanto varrebbe?

16. ● Calcola il campo magnetico a 4,0 cm da un lungo filo rettilineo percorso da una corrente di 12 A e confrontalo con il campo terrestre (5×10^{-5} T).

17. ● Una spira circolare di raggio 10 cm è percorsa da una corrente di 5,0 A. Calcola il campo magnetico al suo centro.

18. ●● Un solenoide lungo 20 cm ha 800 spire. Quale corrente deve percorrerlo perché il campo interno sia di 5,0 mT?

19. ●● Nella Figura 6.5 leggi, sulla curva blu (I = 10 A), il campo a 2,0 cm e a 8,0 cm dal filo. Verifica che il prodotto $B \cdot r$ sia lo stesso nei due punti e controlla uno dei due valori con la formula.

20. ● Completa: due fili paralleli percorsi da correnti di verso opposto si _____ ; la forza per unità di lunghezza è direttamente proporzionale al _____ delle due correnti e inversamente proporzionale alla _____ fra i fili.

Problemi

21. ●● Una barretta di rame orizzontale, lunga 15 cm e di massa 9,0 g, è sospesa a due fili flessibili e leggeri in un campo magnetico uniforme orizzontale di 0,40 T, perpendicolare alla barretta. a) Quale corrente rende nulla la tensione dei fili? b) Se la corrente è il doppio di quella trovata e i fili si staccano, con quale accelerazione parte la barretta?

22. ●●● Due lunghi fili paralleli distano 8,0 cm e sono percorsi da correnti concordi di 15 A e 10 A. a) Calcola la forza per unità di lunghezza fra i fili e dì se è attrattiva o repulsiva. b) Calcola il campo magnetico nel punto a metà strada fra i fili. c) In quale punto del segmento che congiunge i fili il campo è nullo?

23. ●●● (Con i capitoli 4 e 5.) Un solenoide lungo 30 cm ha 600 spire di filo di rame, di resistenza complessiva 4,0 Ω, ed è collegato a un generatore di forza elettromotrice 6,0 V con resistenza interna trascurabile. a) Calcola la corrente e il campo magnetico all'interno. b) Quante volte è più intenso del campo terrestre (5×10^{-5} T)? c) Quale potenza si dissipa per effetto Joule nell'avvolgimento?

24. ●●● Un cavo orizzontale, diretto da sud a nord, porta una corrente continua di 25 A verso nord. Una bussola è posata 5,0 cm sotto il cavo. La componente orizzontale del campo terrestre in quel luogo è $2{,}5 \times 10^{-5}$ T. a) Calcola il campo del cavo nel punto in cui si trova la bussola e indicane la direzione. b) Di quale angolo, rispetto al nord, devia l'ago, e verso quale lato? c) A quale distanza dal cavo dovrebbe stare la bussola perché la deviazione fosse soltanto di 10°?

25. ●● Una bobina quadrata di 200 spire, di lato 5,0 cm, percorsa da una corrente di 0,80 A, può ruotare attorno a un asse che passa per i punti medi di due lati opposti, in un campo uniforme di 0,15 T. Il piano della bobina è parallelo al campo, e i due lati paralleli all'asse sono perpendicolari al campo. a) Calcola la forza su ciascuno di questi due lati (tieni conto di tutte le spire). b) Calcola il momento della coppia. c) Quanto vale il momento quando il piano della bobina è perpendicolare al campo?

Ragionare e argomentare

26. ●● Commenta la fonte. Nello *Ione* di Platone (533d–e) Socrate paragona l'ispirazione del poeta alla pietra «che Euripide chiamò Magnetide e i più chiamano Eraclea»: «Questa pietra non soltanto attira gli anelli di ferro, ma infonde in essi una forza, così che possono fare a loro volta ciò che fa la pietra, attirare altri anelli; e talvolta si forma una lunga catena di anelli appesi gli uni agli altri» (traduzione della redazione). Che cosa osserva Platone? Come si spiega oggi il fenomeno? Con quale semplice esperimento verificheresti che gli anelli sono diventati magneti, e che cosa accade se si allontana la pietra?

27. ● Trova l'errore. Uno studente calcola il campo a 3,0 cm da un filo con una corrente di 6,0 A così: «$B = \mu_0 I/(2\pi r) = 4\pi \times 10^{-7} \cdot 6{,}0 \,/\, (2\pi \cdot 3{,}0)$ T $= 4{,}0 \times 10^{-7}$ T». Individua l'errore, correggilo e spiega perché il risultato dello studente avrebbe dovuto insospettirlo.

28. ●●● Stima e spiega. Nel cavo di una lampada da tavolo due fili, a circa 3 mm di distanza, portano la corrente all'andata e al ritorno. a) Supponi per semplicità una corrente continua di 10 A (un valore elevato per una lampada) e stima la forza per metro fra i due fili: attrattiva o repulsiva? b) Spiega perché una bussola posata a 20 cm dal cavo quasi non risente della corrente, anche se il campo di un solo filo a quella distanza sarebbe paragonabile a quello terrestre.

Verso l'esame

29. ●● **Dal documento.** «*Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam*»: è il titolo dell'opuscolo latino di quattro pagine che Hans Christian Oersted fece circolare in Europa il 21 luglio 1820 (vedi anche la Figura 6.3). a) Quale fenomeno descrive l'opuscolo, e come si osserva in laboratorio? b) Quale legge permette oggi di calcolare il campo prodotto da un filo, e da che cosa dipende? c) Collega la scoperta alla cultura filosofica del primo Ottocento che hai studiato in filosofia.

30. ●●● **Problema breve commentato.** Il magnete di un apparecchio per la risonanza magnetica è, con buona approssimazione, un solenoide lungo 1,6 m che produce all'interno un campo di 1,5 T. a) Quanto deve valere il prodotto $N\,I$ (numero di spire per corrente)? b) Se la corrente nell'avvolgimento è di 400 A, quante spire servono? c) Commenta il risultato: perché in questi apparecchi l'avvolgimento è superconduttore, cioè ha resistenza nulla (capitolo 4)?

31. ●● **Trattazione sintetica.** In 10–15 righe spiega come si definiscono la direzione, il verso e l'intensità del campo magnetico, e perché per l'intensità si usa la forza su un filo percorso da corrente. Confronta questa definizione con quella del campo elettrico.

PER APPROFONDIRE

- [GIL] William Gilbert, *De magnete*: il libro I, con le esperienze sulla *terrella* e l'idea della Terra come grande magnete.
- [EIN] A. Einstein, L. Infeld, *L'evoluzione della fisica*: le pagine sull'esperienza di Oersted e sulla nascita del concetto di campo.
- [FEY] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, *La fisica di Feynman*, vol. II: i capitoli sulla magnetostatica, per chi vuole vedere le stesse leggi in forma più generale.
- [HRW] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fondamenti di fisica*: i capitoli sul campo magnetico e sui campi prodotti dalle correnti, con molti esercizi.
- [MAX] J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*: la parte sull'elettromagnetismo, dove Maxwell discute le esperienze di Oersted e di Ampère.

Glossario del capitolo

Bussola
Ago magnetizzato libero di ruotare su un perno, che si orienta lungo il campo magnetico terrestre con il polo nord verso il nord.

Calamita
Corpo che attira il ferro e ha due poli magnetici; sinonimo di magnete.

Campo magnetico
Vettore $\boldsymbol{B}$ che in ogni punto ha la direzione e il verso del polo nord di un ago magnetico e il modulo $B = F/(I\,L)$ per un filo perpendicolare al campo; si misura in tesla.

Campo magnetico uniforme
Campo che ha lo stesso modulo, la stessa direzione e lo stesso verso in tutti i punti di una regione, come all'interno di un solenoide.

Collettore
Anello diviso in due metà, sul quale strisciano le spazzole: nel motore in corrente continua inverte la corrente nella spira a ogni mezzo giro.

Declinazione magnetica
Angolo fra la direzione indicata dall'ago della bussola e il meridiano geografico.

Elettromagnete
Solenoide con un nucleo di ferro, che produce un campo magnetico intenso finché è percorso da corrente.

Galvanometro
Strumento che rivela e misura correnti deboli con una bobina che ruota in un campo magnetico, trattenuta da una molla.

Inclinazione magnetica
Angolo fra un ago magnetico libero di ruotare in verticale e il piano orizzontale.

Legge di Biot–Savart
Per un lungo filo rettilineo: $B = \mu_0 I/(2\pi r)$, con linee del campo circolari attorno al filo.

Linee del campo magnetico
Curve tangenti in ogni punto al campo magnetico; sono chiuse: fuori da una calamita vanno da N a S, dentro da S a N.

Magnetite
Minerale di ferro che attira il ferro: il magnete naturale conosciuto fin dall'antichità.

Motore elettrico in corrente continua
Dispositivo in cui una coppia di forze magnetiche fa ruotare una bobina, mentre il collettore inverte la corrente a ogni mezzo giro: trasforma energia elettrica in energia meccanica.

Permeabilità magnetica del vuoto
Costante $\mu_0 \approx 4\pi \times 10^{-7}$ T·m/A che compare nelle leggi dei campi magnetici prodotti dalle correnti.

Poli magnetici
Le due regioni di un magnete in cui l'azione magnetica è più intensa, polo nord e polo sud: poli dello stesso nome si respingono, di nome diverso si attraggono.

Prodotto vettoriale
Vettore $\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b}$ di modulo $a\,b$ sen θ, perpendicolare ai due vettori, con il verso dato dalla regola della mano destra.

Regola della mano destra
Con il pollice nel verso della corrente, le dita piegate attorno al filo danno il verso delle linee del campo; nel prodotto vettoriale, le dita piegate da $\boldsymbol{a}$ verso $\boldsymbol{b}$ lasciano il pollice nel verso di $\boldsymbol{a} \times \boldsymbol{b}$.

Solenoide
Filo avvolto ad elica in molte spire; all'interno il campo è uniforme, $B = \mu_0 N\,I/L$.

Spira
Filo conduttore chiuso a forma di anello; al centro di una spira circolare $B = \mu_0 I/(2R)$.

Tesla
Unità di misura del campo magnetico nel SI: 1 T = 1 N/(A·m).

Soluzioni

1. B. Ogni pezzo è una calamita completa: i poli non si separano.

2. C. Il polo N dell'ago è attratto da un polo di nome opposto: vicino al nord geografico c'è un polo che si comporta come un polo sud magnetico.

3. A. Una corrente, cioè cariche in moto, orienta l'ago: genera un campo magnetico.

4. D. $F = I\,L\,B$ sen 0° = 0.

5. B. Da $B = F/(I\,L)$: 1 T = 1 N/(A · m).

6. C. $B = \mu_0 I/(2\pi r)$ è inversamente proporzionale a r.

7. D. $B = \mu_0 N\,I/L$ è proporzionale a N.

8. V. Fuori dalla calamita le linee vanno da N a S; dentro si richiudono da S a N.

9. F. Correnti concordi si attraggono; si respingono le correnti discordi.

10. V. Lontano dalle estremità le linee sono parallele ed equidistanti.

11. F. La forza è sempre perpendicolare sia al filo sia al campo; per il filo parallelo al campo è nulla.

12. V. 1,5 T / $(5 \times 10^{-5}$ T) = 3×10^4.

13. a) $5{,}0 \times 10^{-5}$ T; b) 12 mT; c) 300 μT.

14. $F = I\,L\,B$ = 5,0 A · 0,40 m · 0,080 T = 0,16 N.

15. $F = I\,L\,B$ sen θ = 4,0 · 0,25 · 0,50 · sen 40° N ≈ 0,32 N. La forza è massima per θ = 90° e vale 4,0 · 0,25 · 0,50 N = 0,50 N.

16. $B = \mu_0 I/(2\pi r) = 4\pi \times 10^{-7} \cdot 12$ / (2π · 0,040) T = $6{,}0 \times 10^{-5}$ T: dello stesso ordine del campo terrestre, poco di più.

17. $B = \mu_0 I/(2R) = 4\pi \times 10^{-7} \cdot 5{,}0$ / (2 · 0,10) T ≈ $3{,}1 \times 10^{-5}$ T.

18. $I = B\,L/(\mu_0 N) = 5{,}0 \times 10^{-3} \cdot 0{,}20$ / $(4\pi \times 10^{-7} \cdot 800)$ A ≈ 0,99 A, cioè circa 1,0 A.

19. Sul grafico: 100 μT a 2,0 cm e 25 μT a 8,0 cm. I prodotti sono 100 μT · 2,0 cm = 200 μT·cm e 25 μT · 8,0 cm = 200 μT·cm: uguali. Con la formula, a 2,0 cm: $4\pi \times 10^{-7} \cdot 10$ / (2π · 0,020) T = $1{,}0 \times 10^{-4}$ T = 100 μT.

20. respingono; prodotto; distanza.

21. a) La tensione è nulla quando $I\,L\,B = m\,g$: $I = m\,g/(B\,L)$ = 0,0090 · 9,8 / (0,40 · 0,15) A ≈ 1,5 A (con il verso che dà una forza verso l'alto). b) Con corrente doppia la forza magnetica è $2m\,g$; la forza risultante è $2m\,g - m\,g = m\,g$ verso l'alto, e l'accelerazione è g = 9,8 m/s^2 verso l'alto.

22. a) $F/L = \mu_0 I_1 I_2/(2\pi d) = 4\pi \times 10^{-7} \cdot 15 \cdot 10$ / (2π · 0,080) N/m ≈ $3{,}8 \times 10^{-4}$ N/m, attrattiva (correnti concordi). b) A metà strada (r = 0,040 m) i due campi hanno versi opposti (con la regola della mano destra): $B_1 = 2 \times 10^{-7} \cdot 15/0{,}040$ T = $7{,}5 \times 10^{-5}$ T, $B_2 = 2 \times 10^{-7} \cdot 10/0{,}040$ T = $5{,}0 \times 10^{-5}$ T; il campo risultante è $2{,}5 \times 10^{-5}$ T, nel verso del campo del filo 1. c) Il campo è nullo dove $I_1/x = I_2/(d - x)$: $15(0{,}080 - x) = 10x$, x = 0,048 m. Il punto dista 4,8 cm dal filo con 15 A e 3,2 cm da quello con 10 A, più vicino al filo con la corrente minore.

23. a) $I = f_{em}/R$ = 6,0 V / 4,0 Ω = 1,5 A; $B = \mu_0 N\,I/L = 4\pi \times 10^{-7} \cdot 600 \cdot 1{,}5$ / 0,30 T ≈ $3{,}8 \times 10^{-3}$ T. b) $3{,}8 \times 10^{-3}$ / (5×10^{-5}) ≈ 75 volte. c) $P = \Delta V \cdot I$ = 6,0 V · 1,5 A = 9,0 W (oppure $R\,I^2 = 4{,}0 \cdot 1{,}5^2$ W = 9,0 W).

24. a) $B = \mu_0 I/(2\pi r) = 4\pi \times 10^{-7} \cdot 25$ / (2π · 0,050) T = $1{,}0 \times 10^{-4}$ T. Con la regola della mano destra (pollice verso nord, dita che passano sotto il cavo) il campo sotto il cavo è orizzontale e diretto verso ovest. b) L'ago si allinea con la somma del campo terrestre ($2{,}5 \times 10^{-5}$ T verso nord) e di quello del cavo ($1{,}0 \times 10^{-4}$ T verso ovest), perpendicolari fra loro: tan α = $1{,}0 \times 10^{-4}/(2{,}5 \times 10^{-5}) = 4{,}0$, $\alpha \approx 76°$ verso ovest. c) Serve $B_{cavo} = 2{,}5 \times 10^{-5}$ T · tan 10° ≈ $4{,}4 \times 10^{-6}$ T, cioè $r = \mu_0 I/(2\pi B) = 4\pi \times 10^{-7} \cdot 25$ / (2π · $4{,}4 \times 10^{-6}$) m ≈ 1,1 m.

25. a) Su ogni lato $F = N\,I\,L\,B$ = 200 · 0,80 · 0,050 · 0,15 N = 1,2 N, in versi opposti sui due lati. b) Il braccio

della coppia è la distanza fra i due lati, 0,050 m: $M = F\,d = 1{,}2\ \text{N} \cdot 0{,}050\ \text{m} = 0{,}060\ \text{N·m}$. c) Zero: le due forze agiscono sulla stessa retta.

26. Traccia di risposta. Platone osserva che il ferro vicino alla pietra acquista la proprietà della pietra: gli anelli si magnetizzano e attirano altri anelli, formando una catena (la stessa che descrive Lucrezio). Oggi diciamo che il ferro si magnetizza nel campo del magnete (magnetizzazione per influenza, capitolo 7). Verifica: si stacca un anello dalla catena e lo si avvicina a una bussola o a della limatura di ferro, osservando se la attira; oppure, tenendo la catena, si allontana la pietra. Con il ferro dolce, allontanata la pietra, la catena si scioglie quasi subito: il ferro perde gran parte della magnetizzazione. L'osservazione di Platone è corretta; la «forza divina» che, nel dialogo, passa dalla Musa al poeta e da questo agli ascoltatori come da un anello all'altro è un'immagine poetica, mentre la fisica la descrive come un campo che magnetizza il ferro.

27. L'errore è la distanza in centimetri: va espressa in metri, $r = 0{,}030$ m. Il risultato corretto è $B = 4\pi \times 10^{-7} \cdot 6{,}0 \,/\, (2\pi \cdot 0{,}030)\ \text{T} = 4{,}0 \times 10^{-5}\ \text{T}$, cento volte maggiore. Lo studente avrebbe dovuto insospettirsi perché 4×10^{-7} T è cento volte meno del campo terrestre: con quel valore Oersted non avrebbe visto muoversi l'ago, mentre a pochi centimetri da un filo con qualche ampere l'ago si muove chiaramente.

28. a) $F/L = 4\pi \times 10^{-7} \cdot 10 \cdot 10 \,/\, (2\pi \cdot 0{,}003)\ \text{N/m} \approx 7 \times 10^{-3}$ N/m, repulsiva perché le correnti sono discordi (andata e ritorno): pochi millinewton per metro, trattenuti senza sforzo dall'isolante. b) Il campo di un filo a 20 cm sarebbe $4\pi \times 10^{-7} \cdot 10/(2\pi \cdot 0{,}20)\ \text{T} = 1 \times 10^{-5}$ T, paragonabile a quello terrestre; ma i due fili portano correnti opposte e distano solo 3 mm, molto meno di 20 cm, per cui a quella distanza i loro campi hanno quasi lo stesso modulo e versi opposti, e quasi si cancellano. Per questo i fili di andata e di ritorno si tengono vicini nei cavi.

29. Traccia di risposta. a) L'opuscolo descrive la deviazione di un ago magnetico posto vicino a un filo percorso da corrente: con il filo parallelo all'ago, chiudendo il circuito l'ago ruota, e inverte la deviazione se si inverte la corrente o se si sposta l'ago dall'altra parte del filo (Figura 6.3). La corrente genera un campo magnetico. b) La legge di Biot–Savart per il filo rettilineo, $B = \mu_0 I/(2\pi r)$: il campo è proporzionale alla corrente e inversamente proporzionale alla distanza; le linee sono circonferenze attorno al filo (regola della mano destra). c) Oersted si era formato su Kant ed era vicino alla *Naturphilosophie* romantica (Schelling, Ritter), per cui tutte le forze della natura sono espressione di un'unica attività: cercava proprio un legame fra elettricità e magnetismo. Si può discutere il rapporto fra un'idea filosofica, che orienta la ricerca, e la verifica sperimentale, che la rende una conoscenza fisica.

30. a) Da $B = \mu_0 N\,I/L$: $N\,I = B\,L/\mu_0 = 1{,}5 \cdot 1{,}6 \,/\, (4\pi \times 10^{-7})\ \text{A} \approx 1{,}9 \times 10^{6}$ A. b) $N = 1{,}9 \times 10^{6} / 400 \approx 4{,}8 \times 10^{3}$ spire, quasi cinquemila. c) Commento: servono quasi due milioni di ampere-spire, mantenuti per anni. Con un filo di rame ordinario la potenza dissipata per effetto Joule, $R\,I^2$, sarebbe enorme e il magnete si surriscalderebbe; con un superconduttore la resistenza è nulla, la corrente circola senza dissipare energia e il campo resta stabile. Il prezzo è il raffreddamento a temperature bassissime, con elio liquido.

31. Traccia di risposta (modello). Il campo magnetico in un punto è un vettore. Direzione e verso si definiscono con un piccolo ago magnetico: sono quelli del suo polo nord quando l'ago è in equilibrio nel punto. Per l'intensità serve una grandezza misurabile: un ago non si presta, perché i poli non si isolano e la forza su un polo non si misura da sola. Si usa allora la forza su un tratto di filo percorso da corrente, che si misura con una bilancia e risulta proporzionale a I e a L: disposto il filo perpendicolare al campo, dove la forza è massima, $B = F/(I\,L)$, in tesla, $1\ \text{T} = 1\ \text{N/(A·m)}$. Il confronto con il campo elettrico: anche $\boldsymbol{E}$ si definisce con una forza divisa per la grandezza che la «sente», $\boldsymbol{E} = \boldsymbol{F}/q$, ma la forza elettrica è parallela al campo, mentre quella magnetica è perpendicolare sia al filo sia al campo ($\boldsymbol{F} = I\,\boldsymbol{L} \times \boldsymbol{B}$). Inoltre la carica di prova esiste isolata, il polo magnetico no; le linee del campo elettrico partono e finiscono sulle cariche, quelle magnetiche sono chiuse.