CAPITOLO

8

L'induzione elettromagnetica

«Queste considerazioni, e la loro conseguenza, la speranza di ottenere elettricità dal magnetismo ordinario, mi hanno spinto più volte a studiare sperimentalmente l'effetto induttivo delle correnti elettriche.» — Michael Faraday, Experimental Researches in Electricity, Prima serie (1831), § 4 (traduzione della redazione)

OBIETTIVI

1. Descrivere gli esperimenti di Faraday e riconoscere che una corrente indotta nasce solo da un campo magnetico variabile.
2. Definire e calcolare il flusso del campo magnetico e riconoscere i tre modi di farlo cambiare.
3. Applicare la legge di Faraday–Neumann, anche leggendo un grafico del flusso in funzione del tempo.
4. Prevedere il verso della corrente indotta con la legge di Lenz e collegarla alla conservazione dell'energia.
5. Ricavare la forza elettromotrice cinetica in due modi e fare il bilancio di potenza di un conduttore in moto.
6. Spiegare le correnti di Foucault e l'autoinduzione e riconoscerle nelle applicazioni.

INDICE DEL CAPITOLO

8.1 La scoperta di Faraday 2
8.2 Il flusso del campo magnetico 5
8.3 La legge di Faraday–Neumann 6
8.4 La legge di Lenz 9
8.5 La forza elettromotrice cinetica 13
8.6 L'autoinduzione 15

Fisica 5 · Parte IV · Induzione e onde elettromagnetiche · versione 1.0
Capitolo 8: L'induzione elettromagnetica · pagine 231–252 del volume completo · estratto per lo studio

Avvicina in fretta un magnete a una bobina di filo di rame collegata a un voltmetro sensibile: l'indice sobbalza. Tieni il magnete fermo, anche dentro la bobina: l'indice torna a zero. Tiralo via: l'indice sobbalza di nuovo, ma dall'altra parte. Nessuna pila, nessun contatto: solo un magnete che si muove. È il fenomeno che fa funzionare quasi tutte le centrali elettriche del mondo, il caricatore senza fili di un telefono, i fornelli a induzione e il pick-up di una chitarra elettrica.

Nel capitolo 6 hai visto, con Oersted, che una corrente elettrica produce un campo magnetico. Questo capitolo racconta la scoperta inversa, compiuta da Michael Faraday nel 1831: un campo magnetico può produrre una corrente, ma soltanto se *cambia*. Imparerai a misurare «quanto campo» attraversa un circuito con il flusso magnetico, a calcolare la forza elettromotrice indotta con la legge di Faraday–Neumann, a prevederne il verso con la legge di Lenz, e scoprirai che dietro quel verso c'è un principio che conosci da due anni: la conservazione dell'energia.

8.1 La scoperta di Faraday

8.1.1 Una domanda rovesciata

Dopo l'esperienza di Oersted (1820) la domanda era nell'aria: se l'elettricità in moto produce effetti magnetici, il magnetismo non potrà produrre elettricità? Per una decina d'anni diversi fisici, Faraday compreso, cercarono una corrente *costante* in un filo posto accanto a un magnete o a un altro filo percorso da corrente, e non trovarono nulla. Il motivo, lo vedremo, è che cercavano l'effetto nel momento sbagliato: quando tutto è fermo e costante.

DA RICORDARE

Dai capitoli 6 e 7: il campo magnetico

Il campo magnetico $\boldsymbol{B}$ si misura in tesla (T). Un filo rettilineo di lunghezza L percorso dalla corrente I in un campo $\boldsymbol{B}$ subisce la forza $F = ILB \operatorname{sen}\theta$, e una carica q che si muove con velocità $\boldsymbol{v}$ subisce la forza di Lorentz $F = |q|vB \operatorname{sen}\theta$; in entrambi i casi la direzione si trova con la regola della mano destra, ed è perpendicolare sia a $\boldsymbol{B}$ sia al filo (o alla velocità).

Dentro un solenoide lungo, con N spire su una lunghezza L, il campo è uniforme e vale $B = \mu_0 NI/L$; inserendo un nucleo di ferro, materiale ferromagnetico, il campo diventa molto più intenso. Le linee del campo magnetico sono sempre chiuse.

8.1.2 L'anello del 29 agosto 1831

Il 29 agosto 1831 Faraday prese un anello di ferro dolce e vi avvolse sopra, da parti opposte, due bobine di filo di rame isolato, A e B (Figura 8.1). Collegò la bobina A a una pila attraverso un interruttore e la bobina B a un galvanometro, lo strumento con un ago magnetico che segnala il passaggio di una corrente anche debolissima. Le due bobine non si toccavano: l'unico legame fra i due circuiti era il ferro, che la corrente di A magnetizzava come il nucleo di un elettromagnete.

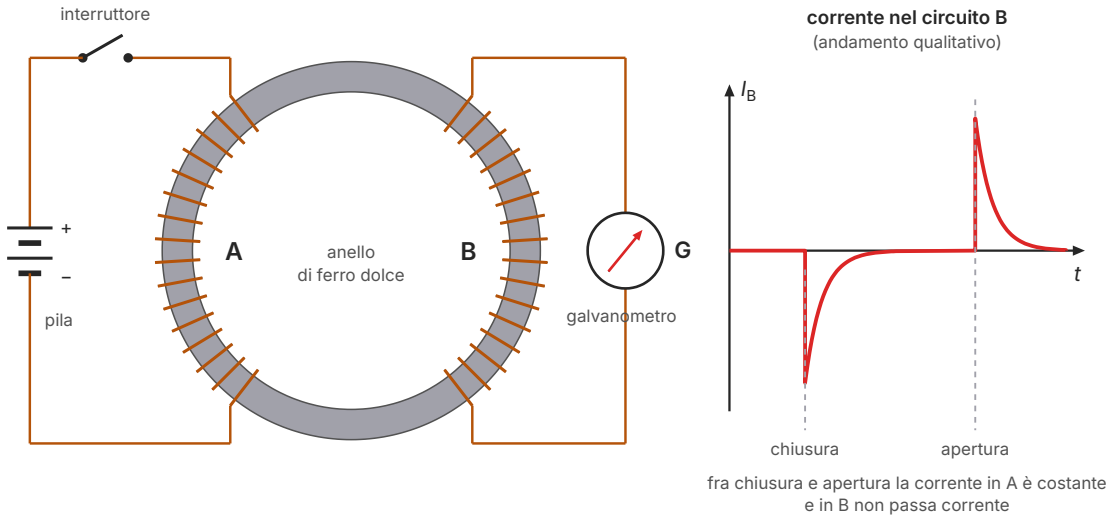


Figura 8.1 L'esperimento dell'anello di Faraday (schema). La bobina A è collegata a una pila tramite un interruttore, la bobina B a un galvanometro; il ferro dell'anello porta il campo magnetico prodotto da A dentro B. Nel grafico, qualitativo, la corrente in B: un impulso quando si chiude il circuito A, nessuna corrente finché la corrente in A resta costante, un impulso di verso opposto quando lo si apre.

Nella relazione letta alla Royal Society il 24 novembre 1831, la prima delle sue *Experimental Researches in Electricity*, Faraday descrisse così quello che vide alla chiusura del circuito: il galvanometro deviò subito, «ma, benché il contatto fosse mantenuto, l'effetto non era permanente, perché l'ago tornò presto nella sua posizione naturale, come se fosse del tutto indifferente al dispositivo elettromagnetico collegato». E aggiunse: «Interrompendo il contatto con la pila, l'ago fu di nuovo deviato con forza, ma in direzione contraria» (*Experimental Researches*, Prima serie, § 28; traduzione della redazione).

Finché nella bobina A circola una corrente costante, il ferro è magnetizzato e il campo magnetico dentro la bobina B è intenso, ma costante: in B non passa corrente. La corrente in B compare solo nei brevi istanti in cui il campo *cambia*: quando cresce, alla chiusura del circuito A, e quando sparisce, all'apertura, con verso opposto. Il fenomeno per cui un campo magnetico

variabile produce una corrente in un circuito si chiama **induzione elettromagnetica**; la corrente così prodotta è la **corrente indotta**. Quando, come nell'anello, la variazione di corrente in un circuito induce una corrente in un altro circuito vicino si parla di **mutua induzione**.

8.1.3 Il magnete e la bobina

Nelle settimane successive Faraday ottenne lo stesso effetto senza pila: inserendo in una bobina un cilindro di magnete permanente, e poi estraendolo. Il galvanometro deviava durante il movimento, da una parte all'entrata e dall'altra all'uscita, e restava fermo se il magnete era fermo, dentro o fuori. Lo stesso accadeva tenendo fermo il magnete e muovendo la bobina: conta il moto *relativo*. E l'effetto era tanto più grande quanto più rapido era il movimento e quanto più numerose le spire della bobina.

In tutte queste esperienze il circuito indotto si comporta come se contenesse un generatore: la causa che mette in moto le cariche è una **forza elettromotrice indotta**, che indicheremo con f_{em} e misureremo in volt come quella di una pila (capitolo 4). Se il circuito è chiuso e ha resistenza totale R, la corrente indotta vale, per la prima legge di Ohm, $I = f_{\text{em}}/R$; se è aperto, la f.e.m. c'è ugualmente e si misura con un voltmetro ai suoi capi. Resta da capire *quale* grandezza deve cambiare perché compaia. Serve una misura di quanto campo magnetico «attraversa» un circuito.

COLLEGAMENTI

Le parole della fisica

Induzione viene dal latino *inductio*, da *inducere*, «condurre dentro», «introdurre». In fisica la parola indicava già l'elettrizzazione a distanza di un conduttore (capitolo 1), e Faraday la estese apertamente al suo nuovo fenomeno, nel primo paragrafo della Prima serie: il termine generale *Induction*, scrive, «può essere usato con proprietà nello stesso senso generale per esprimere il potere che le correnti elettriche possono avere di indurre un particolare stato nella materia nelle loro immediate vicinanze» (§ 1; traduzione della redazione). In logica e in filosofia l'*induzione* è invece il procedimento che dai casi particolari risale alla legge generale: la stessa parola latina, un altro «condurre».

Elettromagnetismo è un composto moderno delle due parole che hai già incontrato: *elettrico*, dal greco ἤλεκτρον, «ambra», attraverso il latino scientifico *electricus* di Gilbert (capitolo 1), e *magnete*, dal greco Μαγνῆτις λίθος, «pietra di Magnesia» (capitolo 6). Dopo Oersted e Faraday i due fenomeni non si potevano più studiare separatamente, e una sola parola li riunisce.

Weber e **henry** sono unità che portano il nome di due scienziati (Tabella A.9): il tedesco Wilhelm Weber (1804–1891), che nel 1833 costruì a Gottinga con Carl Friedrich Gauss un telegrafo elettromagnetico, e l'americano Joseph Henry (1797–1878), che osservò l'induzione in modo indipendente negli stessi anni di Faraday. Come sempre, il nome dell'unità si scrive minuscolo, il simbolo maiuscolo: Wb, H.

8.2 Il flusso del campo magnetico

8.2.1 Quanto campo attraversa una spira

Nel capitolo 2 hai definito il flusso del campo elettrico attraverso una superficie. La stessa idea si applica al campo magnetico. Consideriamo una spira piana di area S in un campo magnetico uniforme $\boldsymbol{B}$, e chiamiamo $\boldsymbol{n}$ la normale alla spira, cioè la direzione perpendicolare alla sua superficie; sia θ l'angolo fra $\boldsymbol{n}$ e $\boldsymbol{B}$. Il **flusso del campo magnetico** attraverso la spira è

$$\Phi(\boldsymbol{B}) = BS\cos\theta$$

Il fattore $S\cos\theta$ è l'area della «ombra» della spira su un piano perpendicolare alle linee di campo, come mostra la Figura 8.2: se disegniamo le linee di campo in modo che la loro densità sia proporzionale a B, il flusso è proporzionale al numero di linee che attraversano la spira. Quando la spira è perpendicolare al campo ($\theta = 0°$) il flusso è massimo, $\Phi = BS$; inclinandola diminuisce; quando le linee di campo scorrono parallele alla sua superficie ($\theta = 90°$) nessuna linea la attraversa e il flusso è nullo. Il flusso è una grandezza scalare e può essere negativo: con θ fra 90° e 180° le linee attraversano la spira «dall'altra parte».

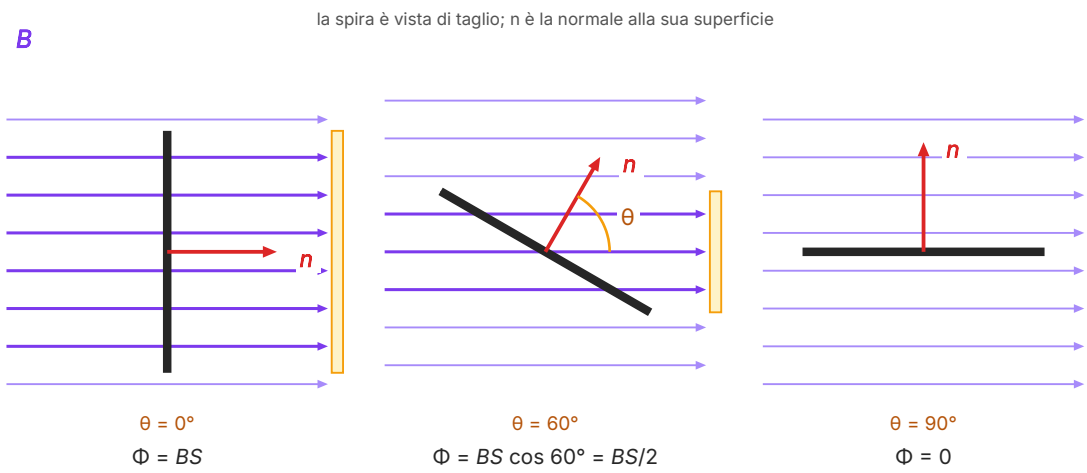


Figura 8.2 Il flusso di un campo magnetico uniforme attraverso una spira di area S, vista di taglio, per tre orientazioni della normale $\boldsymbol{n}$. Le linee di campo in viola scuro sono quelle che attraversano la spira; la barra gialla è la proiezione della spira su un piano perpendicolare al campo, di lunghezza proporzionale a $S\cos\theta$.

L'unità di misura del flusso nel Sistema Internazionale è il **weber** (Wb): $1\ \text{Wb} = 1\ \text{T}\cdot 1\ \text{m}^2$. È un'unità grande rispetto ai flussi della vita quotidiana. Il campo magnetico terrestre, circa 5×10^{-5} T, attraverso una finestra di 1,0 m × 1,5 m perpendicolare al campo dà un flusso di $5\times10^{-5}\ \text{T}\cdot 1{,}5$

$m^2 \approx 7{,}5 \times 10^{-5}$ Wb; dentro un elettromagnete da laboratorio, con $B = 0{,}50$ T, una spira di 12 cm^2 ($1{,}2 \times 10^{-3}$ m^2) perpendicolare al campo è attraversata da $6{,}0 \times 10^{-4}$ Wb.

Per una bobina di N spire uguali, tutte attraversate dallo stesso campo, il flusso totale è N volte quello di una spira: $NBS\cos\theta$. Negli esercizi diremo sempre se un valore di flusso è «per spira» o totale.

8.2.2 Tre modi di far cambiare il flusso

La formula $\Phi = BS\cos\theta$ mostra subito che il flusso attraverso un circuito può cambiare in tre modi, e ciascuno corrisponde a una famiglia di esperienze di Faraday e a una famiglia di applicazioni:

- **cambia B**: nell'anello di ferro la corrente in A cresce o si annulla, e con essa il campo dentro B; un magnete che si avvicina o si allontana da una bobina ferma porta nella bobina un campo più o meno intenso;
- **cambia S**: una spira si deforma, o un tratto di circuito scivola allargando o restringendo l'area racchiusa, come la sbarretta che studieremo più avanti in questo capitolo;
- **cambia θ**: una spira ruota nel campo, e la sua «ombra» si allarga e si restringe; è il principio dell'alternatore, l'argomento del capitolo 9.

8.3 La legge di Faraday–Neumann

8.3.1 La forza elettromotrice indotta

Le esperienze di Faraday si riassumono in una sola legge. In un circuito compare una f.e.m. indotta solo se il flusso del campo magnetico che lo attraversa varia, ed è tanto maggiore quanto più rapida è la variazione. Se in un intervallo di tempo Δt il flusso varia di $\Delta\Phi$, la f.e.m. indotta media è

$$f_{em} = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

È la **legge di Faraday–Neumann**: Faraday ne scoprì il contenuto sperimentale, il tedesco Franz Ernst Neumann le diede nel 1845 la forma matematica. Il segno meno riguarda il verso della corrente indotta e sarà l'argomento del prossimo paragrafo; per ora ci interessa il valore. L'unità torna: un weber al secondo è un volt, perché 1 Wb/s = 1 T · m^2/s = 1 V (lo verificheremo con la forza elettromotrice cinetica). Per una bobina di N spire le f.e.m. delle singole spire, collegate in serie, si sommano:

$$f_{em} = -N\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \qquad (\Delta\Phi\text{: variazione del flusso attraverso una spira})$$

Se la variazione del flusso è uniforme, cioè il flusso cambia della stessa quantità in ogni secondo, la f.e.m. è costante e il valore medio coincide con quello in ogni istante. Se non è uniforme, la formula dà la f.e.m. media sull'intervallo; per conoscere il valore in un istante si sceglie un Δt molto piccolo, nel quale la variazione si possa considerare uniforme. Nota che conta la *rapidità* della variazione, non il valore del flusso: un campo intensissimo ma costante non induce nulla, mentre un campo debole che cambia in fretta può indurre una f.e.m. notevole. È esattamente quello che Faraday vide con l'anello.

ESEMPIO SVOLTO

Una bobina in un campo che cresce

Problema. Una bobina circolare di 150 spire, di raggio 3,0 cm e resistenza 6,0 Ω, ha l'asse parallelo a un campo magnetico uniforme. In 0,20 s il campo cresce in modo uniforme da 0,10 T a 0,40 T. Calcola a) il flusso attraverso una spira all'inizio e alla fine, b) la f.e.m. indotta, c) la corrente indotta.

a) L'area di una spira è $S = \pi r^2 = \pi\,(3{,}0 \times 10^{-2}\ \text{m})^2 = 2{,}83 \times 10^{-3}\ \text{m}^2$. Con l'asse parallelo al campo, $\theta = 0°$ e $\cos\theta = 1$: $\Phi_i = 0{,}10\ \text{T} \cdot 2{,}83 \times 10^{-3}\ \text{m}^2 = 2{,}8 \times 10^{-4}\ \text{Wb}$ e $\Phi_f = 0{,}40\ \text{T} \cdot 2{,}83 \times 10^{-3}\ \text{m}^2 = 1{,}13 \times 10^{-3}$ Wb.

b) $\Delta\Phi = \Phi_f - \Phi_i = 8{,}5 \times 10^{-4}\ \text{Wb}$ per spira. La variazione è uniforme, quindi $|f_{em}| = N\,\Delta\Phi/\Delta t = 150 \cdot 8{,}48 \times 10^{-4}\ \text{Wb}/(0{,}20\ \text{s}) = 0{,}64\ \text{V}$.

c) $I = |f_{em}|/R = 0{,}636\ \text{V}/6{,}0\ \Omega = 0{,}11\ \text{A}$.

Controllo. Se il campo restasse a 0,40 T, nei secondi successivi la f.e.m. sarebbe zero, benché il flusso sia quattro volte quello iniziale. Se la stessa variazione avvenisse in 0,02 s, f.e.m. e corrente sarebbero dieci volte maggiori.

8.3.2 Leggere un grafico del flusso

Quando il flusso è dato da un grafico in funzione del tempo, la legge di Faraday–Neumann si legge direttamente sul grafico: $\Delta\Phi/\Delta t$ è la pendenza della linea, come la velocità era la pendenza del grafico spazio-tempo (Fisica 3, capitolo 10). Dove il grafico sale la f.e.m. ha un segno, dove scende il segno opposto, dove è orizzontale la f.e.m. è zero (Figura 8.3).

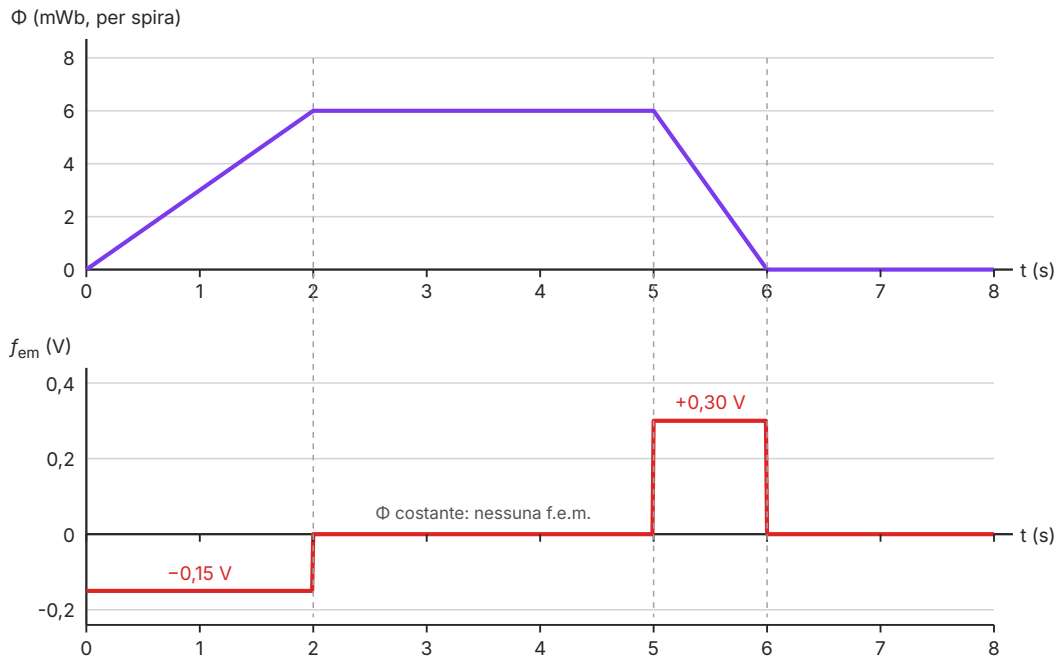


Figura 8.3 Sopra, il flusso attraverso ciascuna spira di una bobina di 50 spire in funzione del tempo; sotto, la forza elettromotrice indotta, calcolata con la legge di Faraday–Neumann: è proporzionale alla pendenza del grafico del flusso, cambiata di segno.

ESEMPIO SVOLTO

Dalla pendenza alla f.e.m.

Problema. La Figura 8.3 (sopra) riporta il flusso attraverso ciascuna spira di una bobina di 50 spire. Ricava la f.e.m. indotta nei tre intervalli 0–2 s, 2–5 s e 5–6 s, e confronta i risultati con il grafico in basso.

0–2 s. Il flusso sale da 0 a 6,0 mWb: $\Delta\Phi/\Delta t = 6{,}0 \times 10^{-3}$ Wb/2,0 s = $3{,}0 \times 10^{-3}$ Wb/s, e $f_{em} = -50 \cdot 3{,}0 \times 10^{-3}$ Wb/s = −0,15 V.

2–5 s. Il flusso resta 6,0 mWb: $\Delta\Phi = 0$, quindi $f_{em} = 0$, anche se il flusso è al suo valore massimo.

5–6 s. Il flusso scende da 6,0 mWb a 0 in 1,0 s: $\Delta\Phi/\Delta t = -6{,}0 \times 10^{-3}$ Wb/s, e $f_{em} = -50 \cdot (-6{,}0 \times 10^{-3}$ Wb/s) = +0,30 V.

Osservazione. I valori coincidono con il grafico in basso. La discesa è più rapida della salita, e la f.e.m. è doppia e di segno opposto: la corrente indotta inverte il verso. Il prodotto f.e.m. · durata vale −0,15 V · 2,0 s = −0,30 V·s nel primo intervallo e +0,30 V · 1,0 s = +0,30 V·s nel terzo: in valore assoluto è sempre $N\Delta\Phi = 50 \cdot 6{,}0$ mWb, perché il flusso, alla fine, è tornato al valore iniziale. Ritroverai questo fatto nel laboratorio del capitolo.

COLLEGAMENTI

Matematica 5: la derivata

Nel corso di matematica di quest'anno incontrerai il limite del rapporto $\Delta\Phi/\Delta t$ quando Δt diventa piccolissimo: è la *derivata* del flusso rispetto al tempo, che si scrive $\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}t$. La legge di Faraday–Neumann, scritta per i valori istantanei, diventa $f_{\text{em}} = -\mathrm{d}\Phi/\mathrm{d}t$: è probabilmente la prima legge fisica che vedrai scritta come una derivata. Geometricamente la derivata è la pendenza della retta tangente al grafico del flusso, la stessa che nella Figura 8.3 si legge sui tratti rettilinei. In questo volume useremo sempre la forma con le variazioni finite.

8.4 La legge di Lenz

8.4.1 Il verso della corrente indotta

Il segno meno della legge di Faraday–Neumann esprime una regola trovata nel 1834 dal fisico Emil Lenz, che lavorava a San Pietroburgo. La **legge di Lenz** dice: *la corrente indotta ha un verso tale da produrre un campo magnetico che si oppone alla variazione di flusso che l'ha generata*. Se il flusso attraverso il circuito aumenta, il campo della corrente indotta, dentro il circuito, è opposto al campo esterno e tende a diminuirlo; se il flusso diminuisce, il campo indotto ha lo stesso verso di quello esterno e tende a mantenerlo.

Applichiamo la regola al magnete che si avvicina a una spira con il polo nord davanti (Figura 8.4a). Le linee di campo escono dal polo nord: il campo del magnete attraversa la spira verso destra, e mentre il magnete si avvicina il flusso aumenta. La corrente indotta deve produrre, dentro la spira, un campo verso sinistra; per la regola della mano destra (capitolo 6), vista dal magnete, gira in verso antiorario. La faccia della spira rivolta al magnete diventa così un polo nord, che respinge il magnete: la spira «resiste» all'avvicinamento. Se il magnete si allontana (b) il flusso diminuisce, la corrente gira nell'altro verso, sulla faccia della spira compare un polo sud e la spira attrae il magnete, «resistendo» all'allontanamento.

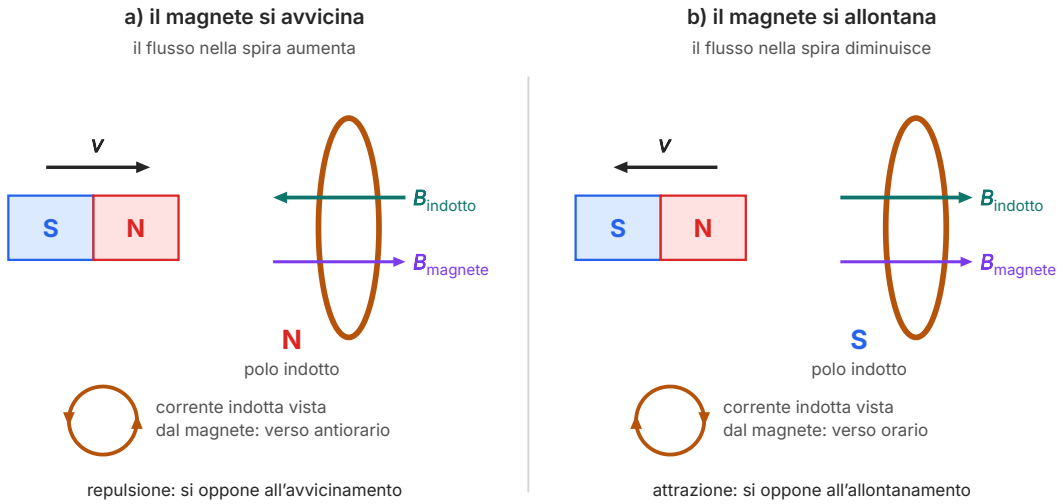


Figura 8.4 La legge di Lenz per un magnete e una spira. a) Il magnete si avvicina con il polo nord: il flusso aumenta, il campo indotto (verde) è opposto a quello del magnete (viola), sulla faccia della spira compare un polo nord e il magnete è respinto. b) Il magnete si allontana: il flusso diminuisce, il campo indotto ha lo stesso verso di quello del magnete e la spira lo attrae. Nei cerchi, il verso della corrente indotta visto dal magnete.

ERRORE FREQUENTE

La corrente indotta si oppone al campo?

No: si oppone alla *variazione* del flusso, non al campo. Molti studenti ricordano «il campo indotto è sempre opposto a quello del magnete», e la regola funziona finché il magnete si avvicina; quando si allontana dà il verso sbagliato, perché in quel caso il campo indotto ha lo stesso verso di quello esterno (Figura 8.4b). Prima di cercare il verso chiediti sempre: il flusso sta aumentando o diminuendo?

Un secondo errore è pensare che un campo intenso induca una corrente intensa. Un magnete potentissimo fermo dentro una bobina non induce nulla: conta solo quanto rapidamente cambia il flusso.

8.4.2 Lenz e la conservazione dell'energia

La legge di Lenz non è una regola da imparare a memoria: è una conseguenza della conservazione dell'energia. La corrente indotta scalda il circuito per effetto Joule (capitolo 5), quindi trasporta energia. Da dove viene? Dal lavoro di chi muove il magnete: proprio perché la spira respinge il magnete che si avvicina e attrae quello che si allontana, per muoverlo bisogna spingere un po' di più, e il lavoro di questa spinta in più è l'energia che il circuito dissipa.

Immaginiamo che la regola fosse rovesciata: un magnete che si avvicina alla spira verrebbe *attirato* dalla corrente indotta, accelererebbe, indurrebbe una corrente ancora maggiore, ver-

rebbe attirato ancora di più. Basterebbe una piccola spinta iniziale per ottenere un magnete sempre più veloce e una corrente sempre più intensa, cioè energia dal nulla: un moto perpetuo, che la conservazione dell'energia esclude (Fisica 4, capitolo 10). Il segno meno nella legge di Faraday–Neumann è dunque il segno della conservazione dell'energia.

Un esperimento sorprendente lo rende visibile. Si lascia cadere un piccolo magnete al neodimio dentro un tubo verticale di rame lungo un metro: il rame non è ferromagnetico e non attira il magnete, eppure il magnete scende lentamente, impiegando alcuni secondi, mentre in un tubo di plastica uguale cade in mezzo secondo circa. Il tubo di rame si può pensare come una pila di spire: sotto il magnete il flusso aumenta, sopra diminuisce, e le correnti indotte nel rame respingono il magnete da sotto e lo attirano da sopra, frenandolo. L'energia potenziale gravitazionale persa dal magnete non diventa energia cinetica, ma calore nel tubo.

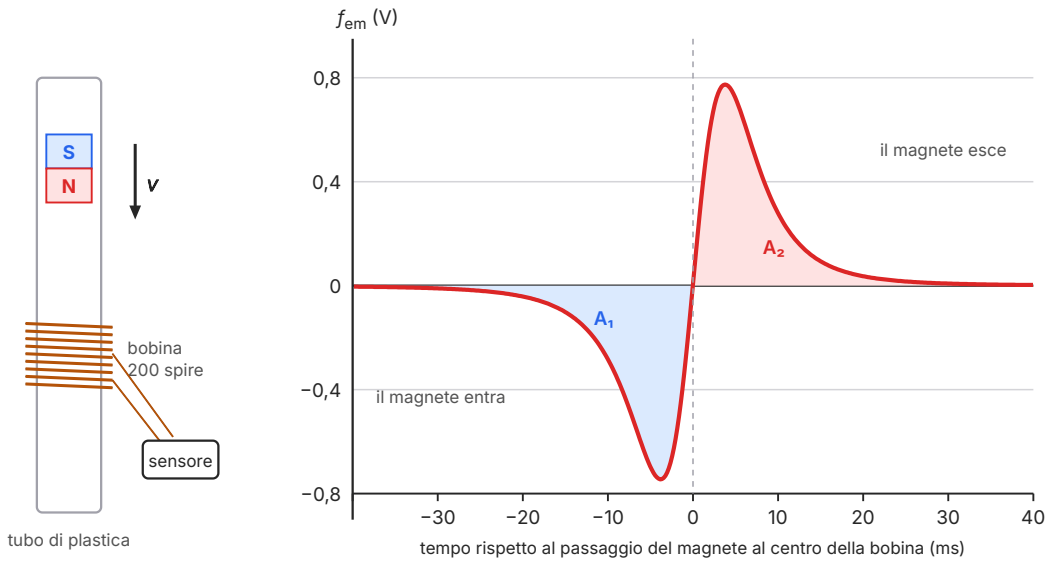


Figura 8.5 La forza elettromotrice indotta in una bobina di 200 spire da un magnete lasciato cadere da 20 cm sopra il suo centro (calcolata con un modello del magnete come piccolo dipolo, in caduta libera). Quando il magnete entra il flusso aumenta, quando esce diminuisce: i due lobi hanno segno opposto. Il secondo è più alto e più stretto perché il magnete, accelerando, esce più in fretta di come è entrato; le aree A_1 e A_2 sono uguali.

COLLEGAMENTI

In laboratorio: un magnete che attraversa una bobina

Materiali. Un magnete cilindrico al neodimio (diametro circa 1 cm); un tubo di plastica verticale lungo 80 cm; una bobina di 200 spire avvolta intorno al tubo a metà altezza; un sensore di tensione collegato a un sistema di acquisizione dati (o a un'interfaccia per smartphone) che registra almeno 1000 valori al secondo; un metro (sensibilità 1 mm).

Procedimento. Si collega la bobina al sensore e si lascia cadere il magnete da fermo, con il polo nord in basso, partendo da un'altezza h sopra il centro della bobina. Il programma registra la f.e.m. in funzione del tempo e calcola l'area di ciascuno dei due lobi della curva. Si ripete la prova per cinque altezze; per ciascuna si annotano il valore massimo della f.e.m. (in valore assoluto, nel secondo lobo) e l'area del primo lobo. La velocità del magnete quando arriva alla bobina si calcola con la conservazione dell'energia, $v = \sqrt{(2gh)}$, trascurando l'attrito con l'aria.

Tabella 8.1 F.e.m. massima e area del primo lobo per un magnete che cade attraverso una bobina di 200 spire, da cinque altezze diverse (dati tipici). Incertezze: h ± 0,2 cm, f.e.m. massima ± 0,02 V, area ± 0,3 mV·s.

h (cm)	$v = \sqrt{(2gh)}$ (m/s)	f_{em} massima (V)	f_{em} massima/v (V·s/m)	area del primo lobo (mV·s)
5,0	0,99	0,40	0,40	6,6
10,0	1,40	0,55	0,39	6,8
15,0	1,71	0,67	0,39	6,6
20,0	1,98	0,77	0,39	6,7
30,0	2,42	0,94	0,39	6,7

Che cosa concludere. La curva ha sempre la forma della Figura 8.5: due lobi di segno opposto, perché il flusso prima cresce e poi diminuisce (legge di Lenz). La f.e.m. massima cresce con l'altezza, e il rapporto fra f.e.m. massima e velocità è costante entro le incertezze, circa 0,39 V·s/m: a velocità doppia, variazione del flusso due volte più rapida e f.e.m. doppia. L'area del lobo, invece, non dipende dall'altezza: vale in media 6,7 mV·s. L'area è il prodotto f.e.m. media · durata, e per la legge di Faraday–Neumann è uguale a $N\Delta\Phi$, la variazione totale del flusso, che dipende solo dal magnete e dalla bobina, non dalla velocità. Se ne ricava il flusso massimo attraverso una spira: $6{,}7 \times 10^{-3}$ Wb/200 ≈ $3{,}4 \times 10^{-5}$ Wb.

Sicurezza. I magneti al neodimio sono fragili e si attraggono con forza: tienili lontani fra loro, dalle dita e da carte di credito, orologi e dispositivi medici come i pacemaker. Il circuito non è collegato a nessuna sorgente esterna.

Per la relazione. Segui lo schema di Fisica 3, capitolo 4. Riporta in un grafico la f.e.m. massima in funzione di v, con le barre d'incertezza, e verifica che i punti stiano su una retta per l'origi-

ne; riporta l'area in funzione di h e commenta perché è costante. Che cosa cambierebbe capovolgendo il magnete? E raddoppiando il numero di spire?

8.5 La forza elettromotrice cinetica

8.5.1 Una sbarretta che scorre

Due guide metalliche parallele, a distanza L, sono collegate a un'estremità da un resistore R; su di esse scorre senza attrito una sbarretta conduttrice con velocità costante $\boldsymbol{v}$, perpendicolare alla sbarretta. Tutto si trova in un campo magnetico uniforme $\boldsymbol{B}$, perpendicolare al piano delle guide (Figura 8.6). Sbarretta, guide e resistore formano un circuito chiuso, e mentre la sbarretta si allontana dal resistore l'area racchiusa dal circuito cresce: il flusso cambia perché cambia S.

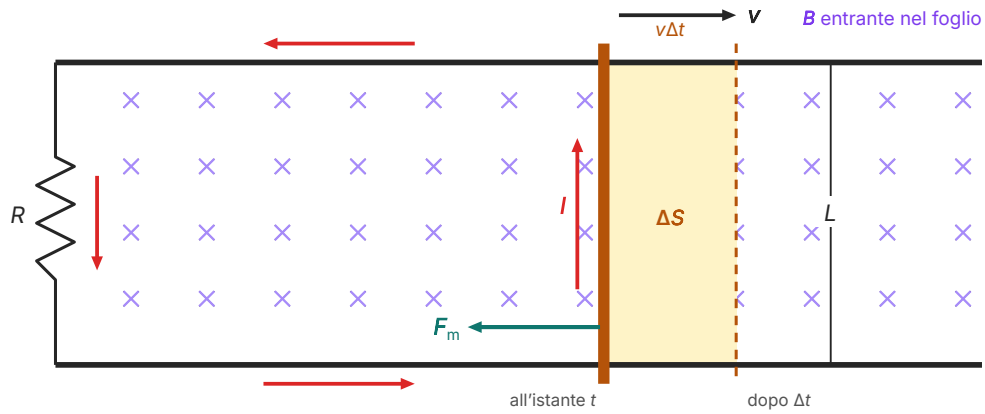


Figura 8.6 La sbarretta che scorre su due guide in un campo magnetico uniforme entrante nel foglio. In un tempo Δt la sbarretta avanza di $v\Delta t$ e l'area del circuito cresce di $\Delta S = Lv\Delta t$ (in giallo). La corrente indotta (rossa) circola in verso antiorario; la forza magnetica $\boldsymbol{F}_m$ sulla sbarretta (verde) si oppone al moto.

In un tempo Δt la sbarretta percorre la distanza $v\Delta t$, e l'area cresce di un rettangolo di lati L e $v\Delta t$: $\Delta S = Lv\Delta t$. Con il campo perpendicolare al piano, $\Delta\Phi = B\Delta S = BLv\Delta t$, e la legge di Faraday–Neumann dà, in valore assoluto,

$$f_{em} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = BLv$$

È la **forza elettromotrice cinetica**, la f.e.m. che nasce in un conduttore che si muove in un campo magnetico. Con $B = 0{,}50$ T, $L = 0{,}40$ m e $v = 2{,}0$ m/s si ottiene $f_{em} = 0{,}40$ V. Le unità tornano, come avevamo promesso: $\mathrm{T \cdot m \cdot m/s = T \cdot m^2/s = Wb/s}$ e, poiché $1\ \mathrm{T} = 1\ \mathrm{N/(A \cdot m)}$, anche $\mathrm{T \cdot m}$

· m/s = N · m/(A · s) = J/C = V. Per la legge di Lenz la corrente indotta deve opporsi all'aumento del flusso entrante, cioè produrre dentro il circuito un campo uscente dal foglio: circola in verso antiorario, e nella sbarretta va dalla guida inferiore a quella superiore.

8.5.2 La stessa f.e.m. vista dalla forza di Lorentz

La stessa formula si ottiene senza parlare di flusso, con la forza di Lorentz del capitolo 7. Gli elettroni di conduzione della sbarretta si muovono con essa a velocità $\boldsymbol{v}$, perpendicolare a $\boldsymbol{B}$: ciascuno subisce una forza di modulo evB, diretta lungo la sbarretta. Per una carica positiva, con la regola della mano destra, la forza punta verso la guida superiore; gli elettroni, negativi, sono spinti verso il basso. È questa forza a far circolare la corrente: lungo tutta la sbarretta essa compie su ogni carica q il lavoro $qvB \cdot L$, e la f.e.m. è il lavoro per unità di carica, $f_{em} = vBL$. Le due spiegazioni, una che guarda il circuito intero e una che guarda le cariche nella sbarretta, danno lo stesso valore e lo stesso verso.

8.5.3 Chi paga l'energia

Ora che nella sbarretta circola la corrente I, il campo esercita su di essa la forza $F = ILB$ del capitolo 6, e la regola della mano destra mostra che è diretta all'indietro, contro la velocità (Figura 8.6): è la legge di Lenz in forma meccanica. Per mantenere costante la velocità bisogna spingere la sbarretta con una forza uguale e opposta, che sviluppa la potenza $P = Fv = ILBv$. Ma BLv è proprio la f.e.m., e quindi $P = f_{em} \cdot I$: la potenza meccanica spesa per spingere è esattamente la potenza elettrica erogata al circuito, che il resistore trasforma in calore. Nessuna energia è creata o distrutta: l'induzione trasforma lavoro meccanico in energia elettrica. Ogni generatore delle centrali elettriche fa la stessa cosa, come vedrai nel capitolo 9.

ESEMPIO SVOLTO

Il bilancio di potenza della sbarretta

Problema. Nel circuito della Figura 8.6 si ha $B = 0{,}50$ T, $L = 0{,}40$ m, $R = 0{,}80\ \Omega$ (resistenza totale del circuito) e la sbarretta si muove a 2,0 m/s. Calcola a) la f.e.m. indotta e la corrente, b) la forza necessaria per mantenere costante la velocità, c) la potenza meccanica e quella dissipata nel resistore.

a) $f_{em} = BLv = 0{,}50\ \text{T} \cdot 0{,}40\ \text{m} \cdot 2{,}0\ \text{m/s} = 0{,}40$ V; $I = f_{em}/R = 0{,}40\ \text{V}/0{,}80\ \Omega = 0{,}50$ A.

b) La forza magnetica sulla sbarretta vale $F_m = ILB = 0{,}50\ \text{A} \cdot 0{,}40\ \text{m} \cdot 0{,}50\ \text{T} = 0{,}10$ N, all'indietro; la forza esterna deve valere 0,10 N in avanti.

c) $P_{mecc} = Fv = 0{,}10\ \text{N} \cdot 2{,}0\ \text{m/s} = 0{,}20$ W; $P_{el} = f_{em} \cdot I = 0{,}40\ \text{V} \cdot 0{,}50\ \text{A} = 0{,}20$ W, uguale a $RI^2 = 0{,}80\ \Omega \cdot (0{,}50\ \text{A})^2 = 0{,}20$ W.

Osservazione. Se si smette di spingere, la forza magnetica frena la sbarretta finché si ferma: la sua energia cinetica si trasforma tutta in calore nel resistore. Raddoppiando la velocità raddoppiano f.e.m., corrente e forza frenante, e la potenza quadruplica.

8.5.4 Le correnti di Foucault

Le correnti indotte non circolano solo nei fili. In un pezzo di metallo massiccio, una lastra o un disco, che si muove in un campo magnetico o si trova in un campo che cambia, il flusso varia attraverso tanti percorsi chiusi interni al metallo, e vi si inducono correnti che girano in piccoli vortici. Sono le **correnti di Foucault**, dette anche correnti parassite, dal nome del fisico francese Léon Foucault che le studiò intorno al 1855. Per la legge di Lenz si oppongono sempre alla causa che le genera, e per l'effetto Joule scaldano il metallo.

Il riscaldamento è sfruttato nei piani di cottura a induzione: sotto la superficie di vetroceramica una bobina è percorsa da una corrente che cambia verso decine di migliaia di volte al secondo, e il campo magnetico variabile induce correnti di Foucault nel fondo metallico della pentola, che si scalda; il piano, che non è conduttore, resta freddo, salvo il calore che riceve dalla pentola. L'effetto frenante è sfruttato nei **freni elettromagnetici**: lastre di metallo fissate ai vagoni di un ottovolante passano fra magneti fissi, e le correnti di Foucault le rallentano senza alcun contatto e senza usura; in alcuni treni ad alta velocità sono invece elettromagneti montati sul treno a indurre le correnti nella rotaia. Questi freni agiscono tanto più quanto più il mezzo è veloce e non possono bloccarlo da fermo, perciò si affiancano ai freni tradizionali. Anche i metal detector sfruttano le correnti indotte in un oggetto metallico nascosto, che producono a loro volta un campo rivelato dallo strumento.

Dove sono indesiderate, le correnti di Foucault si riducono interrompendone i percorsi: i nuclei di ferro dei trasformatori (capitolo 9) non sono blocchi pieni, ma pacchi di lamierini sottili isolati fra loro.

8.6 L'autoinduzione

8.6.1 Un circuito che induce su sé stesso

Una bobina percorsa da corrente produce un campo magnetico, e questo campo attraversa le sue stesse spire: c'è un flusso del campo della bobina attraverso la bobina stessa. Se la corrente cambia, cambia anche questo flusso, e nella bobina si induce una f.e.m. Il fenomeno si chiama **autoinduzione**. Per la legge di Lenz la f.e.m. autoindotta si oppone sempre alla variazione della corrente: quando la corrente cresce la frena, quando diminuisce tende a mantenerla. Per questo, in un circuito con una bobina, la corrente non raggiunge subito il suo valore finale alla chiusura e non si annulla di colpo all'apertura.

Il flusso prodotto da una bobina attraverso sé stessa è proporzionale alla corrente che la percorre. Il coefficiente di proporzionalità si chiama **induttanza** della bobina: dipende soltanto dalla sua forma e dalle sue dimensioni, dal numero di spire e dal materiale del nucleo (con un nucleo di ferro è molto maggiore) e, almeno per una bobina avvolta in aria, non dalla corrente. Si misura in **henry** (H): una bobina ha l'induttanza di 1 H se una corrente di 1 A produce attra-

verso le sue spire un flusso totale di 1 Wb; quindi 1 H = 1 Wb/A. Un componente costruito apposta per avere un'induttanza è un induttore.

8.6.2 La scintilla all'apertura

L'autoinduzione si nota soprattutto quando si apre all'improvviso un circuito che contiene una bobina con il nucleo di ferro, per esempio un elettromagnete. La corrente dovrebbe passare in un istante dal suo valore a zero: il flusso crolla in un tempo brevissimo, e la f.e.m. autoindotta, proporzionale alla rapidità della variazione, può raggiungere centinaia o migliaia di volt, anche se la pila del circuito ne fornisce pochi. Fra i contatti dell'interruttore che si separano scocca una scintilla: la corrente che la attraversa è l'**extracorrente di apertura**. Faraday e Henry la osservarono già negli anni Trenta dell'Ottocento. Nei motori a benzina la bobina di accensione sfrutta lo stesso crollo improvviso del flusso, raccolto da un secondo avvolgimento di moltissime spire, per far scoccare la scintilla nelle candele; negli interruttori dei grandi impianti, al contrario, la scintilla è un pericolo da prevenire.

8.6.3 L'energia del campo magnetico

Per far crescere la corrente in una bobina bisogna vincere la f.e.m. autoindotta, che si oppone: il generatore compie un lavoro. Quell'energia non va persa: resta immagazzinata nel campo magnetico della bobina, ed è proprio l'energia che alla fine riappare nella scintilla. Si dimostra che l'energia immagazzinata in una bobina di induttanza L percorsa dalla corrente I vale

$$U = \tfrac{1}{2}\, L\, I^2$$

La formula è parallela a quella dell'energia di un condensatore carico, $U = \tfrac{1}{2}\, C\Delta V^2$ (capitolo 3): come il condensatore immagazzina energia nel campo elettrico fra le armature, la bobina la immagazzina nel campo magnetico al suo interno. Per esempio una bobina di induttanza 0,50 H percorsa da 2,0 A contiene $\tfrac{1}{2} \cdot 0{,}50\ \text{H} \cdot (2{,}0\ \text{A})^2 = 1{,}0\ \text{J}$. È l'**energia del campo magnetico**: un'idea che nasce dalla visione di Faraday e che Maxwell rese precisa: l'energia non sta soltanto nei fili o nelle cariche, ma nello spazio, nel campo che li circonda.

APPROFONDIMENTO

Faraday, il rilegatore che inventò le linee di forza

Michael Faraday nacque nel 1791 vicino a Londra, figlio di un fabbro, e non ebbe che un'istruzione elementare. A quattordici anni entrò come apprendista nella bottega di un rilegatore e libraio, e cominciò a leggere i libri di scienza che gli passavano fra le mani. Nel 1812 assistette alle lezioni di chimica di Humphry Davy alla Royal Institution, ne trascrisse con cura gli appunti, li rilegò e li mandò a Davy chiedendo un lavoro. Nel 1813 Davy lo assunse come assistente di laboratorio. Faraday lavorò alla Royal Institution per tutta la vita; morì, celebre, nel 1867.

Faraday non possedeva la matematica dei fisici del suo tempo, e forse proprio per questo pensò per immagini. Per descrivere l'azione di magneti e correnti disegnava le *linee di forza*, che si possono rendere visibili con la limatura di ferro (capitolo 6), e le immaginava come qualcosa di reale, che riempie lo spazio. Un circuito, nella sua descrizione, è attraversato da un certo numero di linee, e l'induzione nasce quando questo numero cambia, perché le linee «tagliano» il filo in movimento: è l'idea che oggi esprimiamo con il flusso. Per molti contemporanei erano un semplice disegno; per Faraday erano il segno che tra i corpi lo spazio non è vuoto: è il concetto di campo che hai incontrato nel capitolo 2.

Una generazione dopo, James Clerk Maxwell tradusse le linee di forza di Faraday in equazioni, e ne dedusse che il campo elettromagnetico può propagarsi da solo nello spazio come un'onda: lo vedrai nel capitolo 10.

IN SINTESI

Le formule del capitolo e il loro significato

Flusso del campo magnetico attraverso una spira di area S: $\Phi(\boldsymbol{B}) = BS\cos\theta$, con θ angolo fra $\boldsymbol{B}$ e la normale alla spira; misura quanto campo attraversa la spira. Si misura in weber: 1 Wb = 1 $\mathrm{T\cdot m^2}$.

Legge di Faraday–Neumann: $f_{em} = -N\,\Delta\Phi/\Delta t$ (valore medio; per un valore istantaneo, Δt molto piccolo). Una f.e.m. indotta, in volt, nasce solo se il flusso cambia, ed è tanto maggiore quanto più rapida è la variazione; corrente indotta $I = f_{em}/R$.

Legge di Lenz: il segno meno. La corrente indotta si oppone alla variazione di flusso che la produce: è la conservazione dell'energia.

F.e.m. cinetica: $f_{em} = BLv$ per un conduttore di lunghezza L (m) che si muove con velocità v (m/s) perpendicolare a sé stesso e al campo B (T). Potenza meccanica e potenza elettrica coincidono: $Fv = f_{em}\cdot I$.

Autoinduzione: il flusso di una bobina attraverso sé stessa è proporzionale alla corrente, con coefficiente l'induttanza (henry, 1 H = 1 Wb/A); energia immagazzinata nel campo magnetico $U = \tfrac{1}{2}\,L\,I^2$, in joule.

Con l'induzione elettromagnetica hai in mano il fenomeno su cui si regge la produzione dell'energia elettrica. Nel prossimo capitolo una spira che ruota in un campo magnetico diventerà un alternatore, e scoprirai perché dalla presa di casa esce una corrente che cambia verso cento volte al secondo.

SINTESI

- Nel 1831 Faraday scoprì l'induzione elettromagnetica: un campo magnetico produce una corrente in un circuito solo se il campo che lo attraversa cambia; un campo costante, per quanto intenso, non induce nulla.
- Nell'esperimento dell'anello (29 agosto 1831) la corrente indotta nella bobina B compare solo alla chiusura e all'apertura del circuito A, con versi opposti: è un esempio di mutua induzione. Lo stesso effetto si ottiene muovendo un magnete rispetto a una bobina.
- Il flusso del campo magnetico attraverso una spira è $\Phi = BS\cos\theta$, si misura in weber (1 Wb = 1 T·m^2) e può cambiare perché cambia B, l'area S o l'angolo θ.
- Legge di Faraday–Neumann: $f_{em} = -N\,\Delta\Phi/\Delta t$. Conta la rapidità della variazione del flusso, non il suo valore; su un grafico del flusso in funzione del tempo la f.e.m. è proporzionale alla pendenza, cambiata di segno.
- Legge di Lenz (1834): la corrente indotta produce un campo che si oppone alla variazione del flusso, non al campo. Un magnete che si avvicina a una spira è respinto, uno che si allontana è attratto.
- La legge di Lenz è una conseguenza della conservazione dell'energia: l'energia elettrica indotta viene dal lavoro di chi muove il magnete o il circuito. Con il segno opposto sarebbe possibile un moto perpetuo.
- Un conduttore di lunghezza L che si muove con velocità v perpendicolare a un campo B ha una f.e.m. cinetica $f_{em} = BLv$, che si ricava sia dalla variazione del flusso sia dalla forza di Lorentz sulle cariche; la potenza meccanica spesa è uguale a quella elettrica, $Fv = f_{em} \cdot I$.
- Le correnti di Foucault sono correnti indotte nei pezzi di metallo massicci: scaldano (piani a induzione), frenano senza contatto (freni elettromagnetici), rivelano metalli (metal detector); si riducono con nuclei a lamierini.
- Autoinduzione: una bobina in cui la corrente cambia induce una f.e.m. su sé stessa, che si oppone alla variazione. L'induttanza dipende dalla geometria e dal nucleo e si misura in henry (1 H = 1 Wb/A).
- Aprendo un circuito con una bobina la f.e.m. autoindotta può dare una scintilla (extracorrente di apertura); l'energia immagazzinata nel campo magnetico vale $U = \tfrac{1}{2}\,L\,I^2$, in parallelo con l'energia del condensatore.

ESERCIZI

Comprendere e ricordare

1. ● Nell'esperimento dell'anello di Faraday, il galvanometro collegato alla bobina B devia:
   A. per tutto il tempo in cui nella bobina A circola corrente
   B. solo nell'istante in cui il circuito A viene chiuso o aperto
   C. solo se l'anello è di rame invece che di ferro
   D. mai, perché per indurre una corrente serve un magnete permanente

2. ● Il weber è l'unità di misura:
   A. del flusso del campo magnetico
   B. del campo magnetico
   C. della forza elettromotrice indotta
   D. dell'induttanza

3. ● Una spira è ferma in un campo magnetico uniforme, costante e molto intenso. La corrente indotta nella spira:
   A. è tanto maggiore quanto più intenso è il campo
   B. è massima se la spira è perpendicolare al campo
   C. è nulla
   D. circola sempre in verso orario

4. ●● Il flusso di un campo uniforme B attraverso una spira di area S, quando la normale alla spira è perpendicolare alle linee di campo, vale:
   A. BS
   B. $BS/2$
   C. $-BS$
   D. zero

5. ● Secondo la legge di Lenz, la corrente indotta in un circuito:
   A. produce sempre un campo opposto al campo esterno
   B. produce un campo che si oppone alla variazione del flusso che l'ha generata
   C. ha sempre lo stesso verso, qualunque cosa accada al flusso
   D. esiste solo se il circuito contiene un magnete

6. ●● Un piccolo magnete viene lasciato cadere dentro un tubo verticale di rame. Rispetto alla caduta in un tubo di plastica uguale, il magnete:
   A. cade più lentamente, perché le correnti indotte nel rame lo frenano
   B. cade più in fretta, perché il rame lo attira
   C. cade nello stesso tempo, perché il rame non è ferromagnetico
   D. resta sospeso a metà del tubo

7. ● Le correnti di Foucault sono:
   A. correnti che circolano soltanto nei superconduttori
   B. le correnti alternate della rete domestica
   C. le correnti prodotte da una pila in un circuito chiuso
   D. correnti indotte in un pezzo di metallo massiccio da un flusso variabile

Vero o falso

8. ● Un magnete tenuto fermo dentro una bobina collegata a un galvanometro produce nella bobina una corrente costante. V / F

9. ● Il weber equivale a un tesla per metro quadrato. V / F

10. ●● Se il flusso del campo esterno attraverso una bobina diminuisce, il campo prodotto dalla corrente indotta, dentro la bobina, ha lo stesso verso del campo esterno. V / F

11. ●● Nella sbarretta che scorre sulle guide della Figura 8.6 la forza magnetica sulla corrente indotta spinge la sbarretta nel verso del moto. V / F

12. ● L'induttanza di una bobina senza nucleo di ferro aumenta se si aumenta la corrente che la percorre. V / F

Applicare

13. ● Una spira quadrata di lato 12 cm si trova in un campo uniforme di 0,25 T. Calcola il flusso attraverso la spira quando la sua normale è parallela al campo e quando forma con il campo un angolo di 60°.

14. ● Una spira circolare di raggio 50 cm è immersa nel campo magnetico terrestre, di intensità $5{,}0 \times 10^{-5}$ T; la normale alla spira forma un angolo di 30° con il campo. Calcola il flusso.

15. ● In una bobina di 80 spire il flusso attraverso ciascuna spira passa da 2,0 mWb a 0,50 mWb in 0,030 s. Calcola il valore assoluto della f.e.m. indotta media.

16. ● Completa. In una bobina di resistenza 2,5 Ω è indotta una f.e.m. media di 4,0 V: la corrente indotta media vale _____ A.

17. ●● Usa la Figura 8.3. Se la bobina avesse 100 spire invece di 50, quanto varrebbe la f.e.m. nei tre intervalli 0–2 s, 2–5 s e 5–6 s? E se la discesa del flusso, invece di 1 s, durasse 3 s?

18. ● Una sbarretta lunga 25 cm si muove a 3,0 m/s, perpendicolarmente a sé stessa e a un campo magnetico di 0,60 T. Calcola la f.e.m. cinetica ai suoi capi.

19. ●● Completa. Una bobina di induttanza 0,20 H è percorsa da una corrente di 3,0 A: l'energia immagazzinata nel suo campo magnetico vale _____ J.

Problemi

20. ●●● Un solenoide lungo 50 cm ha 1000 spire (capitolo 6). Al suo interno, coassiale, c'è una piccola bobina di 40 spire, ciascuna di area 4,0 cm^2, collegata a un voltmetro. In 0,10 s la corrente nel solenoide cresce in modo uniforme da 0 a 2,0 A. a) Calcola il campo nel solenoide alla fine. b) Calcola la variazione del flusso attraverso una spira della piccola bobina. c) Quale f.e.m. indica il voltmetro durante la salita, e quale dopo? d) Quale esperimento di Faraday riproduce questo apparato?

21. ●●● Una sbarretta lunga 0,50 m scorre su due guide orizzontali collegate da un resistore, in un campo magnetico verticale di 0,80 T, con velocità costante di 4,0 m/s; la resistenza totale del circuito è 2,0 Ω. a) Calcola la f.e.m. e la corrente indotte. b) Quale forza bisogna applicare alla sbarretta per mantenerne costante la velocità? c) Verifica che la potenza meccanica è uguale alla potenza dissipata nel resistore. d) Quanta energia si trasforma in calore in 5,0 s?

22. ●●● Una bobina quadrata di 20 spire, di lato 10 cm, ruota con velocità angolare costante in un campo uniforme di 0,40 T. All'inizio la sua normale è parallela al campo ($\theta = 0°$), e compie un quarto di giro (fino a $\theta = 90°$) in 0,025 s. a) Calcola la f.e.m. media nel primo quarto di giro. b) Calcola la f.e.m. media nel secondo quarto (da 90° a 180°) e nel terzo (da 180° a 270°), con il loro segno. c) Quanti giri al secondo compie la bobina? Che cosa suggeriscono i segni trovati sul verso della corrente in un giro completo?

23. ●●● Un aereo con un'apertura alare di 60 m vola orizzontalmente a 250 m/s in una regione in cui la componente verticale del campo magnetico terrestre vale $4{,}0 \times 10^{-5}$ T. a) Calcola la f.e.m. cinetica fra le estremità delle ali. b) Un passeggero propone di collegare le estremità con un filo per alimentare una lampadina. Perché non funziona?

24. ●●● Una spira quadrata di lato 10 cm, massa 20 g e resistenza 0,050 Ω cade in un piano verticale; sotto una linea orizzontale c'è un campo magnetico uniforme di 0,50 T, perpendicolare al piano della spira. Il lato inferiore della spira è già entrato nel campo, quello superiore no. a) Spiega con la legge di Lenz perché sul lato inferiore agisce una forza verso l'alto. b) Per quale velocità questa forza equilibra il peso (Fisica 3, capitolo 13)? c) Che cosa diventa, a quella velocità, l'energia potenziale gravitazionale persa dalla spira? Calcola la potenza in gioco.

Ragionare e argomentare

25. ●● Commenta la fonte. Descrivendo l'esperimento dell'anello, Faraday scrive che il galvanometro deviò, «ma, benché il contatto fosse mantenuto, l'effetto non era permanente, perché l'ago tornò presto nella sua posizione naturale» (*Experimental Researches in Electricity*, Prima serie, § 28, 1831; traduzione della redazione). Che cosa osserva Faraday? Quale legge di questo capitolo spiega l'osservazione? Perché i fisici che, prima di lui, cercavano una corrente indotta da un campo costante non l'avevano trovata?

26. ●● Trova l'errore. Uno studente scrive: «Quando si muove un magnete vicino a una spira, la corrente indotta produce sempre un campo magnetico opposto a quello del magnete». Trova un caso in cui l'affermazione è falsa e correggila.

27. ●●● Immagina un mondo in cui la legge di Lenz avesse il segno opposto: la corrente indotta favorirebbe la variazione di flusso invece di opporsi. Descrivi che cosa accadrebbe a un magnete lasciato cadere in un tubo di rame, e spiega perché questo mondo violerebbe la conservazione dell'energia.

Verso l'esame

28. ●● **Dal documento.** «Sotto la superficie di vetroceramica di un piano a induzione c'è una bobina percorsa da corrente che cambia verso decine di migliaia di volte al secondo. Una pentola con il fondo di acciaio si scalda in pochi secondi; una pentola di vetro, appoggiata nello stesso punto, resta fredda, e anche il piano, sotto il vetro, si scalda solo per il calore che riceve dalla pentola.» a) Quale fenomeno descrive il testo? b) Quali leggi del capitolo lo spiegano, e perché la pentola di vetro resta fredda? c) Collega il dispositivo a un tema di Educazione civica: l'uso efficiente dell'energia in casa.

29. ●● **Trattazione sintetica.** In 10–15 righe spiega perché la legge di Lenz è una conseguenza della conservazione dell'energia, usando come esempio un magnete che cade in un tubo di rame.

30. ●● **Problema breve commentato.** Un magnete viene infilato in una bobina di 500 spire in 0,50 s, e il flusso attraverso ciascuna spira passa da zero a $4{,}0 \times 10^{-5}$ Wb. a) Calcola la f.e.m. indotta media. b) Calcola di nuovo la f.e.m. se lo stesso movimento dura 0,050 s. Commenta il risultato: perché, per osservare l'induzione con un magnete, Faraday aveva bisogno di un galvanometro sensibile e di bobine con molte spire?

PER APPROFONDIRE

- [FAR] M. Faraday, *Experimental Researches in Electricity*: la Prima serie (1831) racconta l'anello di ferro, il magnete infilato nella bobina e il disco rotante, con una chiarezza che si segue anche senza formule.
- [EIN] A. Einstein, L. Infeld, *L'evoluzione della fisica*: le pagine sul campo mostrano come le linee di forza di Faraday siano diventate, con Maxwell, il concetto centrale della fisica.
- [FEY] R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, *La fisica di Feynman*, vol. II: i capitoli sull'induzione discutono, con esempi sorprendenti, le due spiegazioni della f.e.m., con il flusso e con la forza sulle cariche.
- [HRW] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Fondamenti di fisica*: il capitolo sull'induzione offre molti problemi graduati su flusso, legge di Lenz e sbarrette in moto.

Glossario del capitolo

Autoinduzione
Induzione di una f.e.m. in un circuito dovuta alla variazione della corrente nel circuito stesso; la f.e.m. autoindotta si oppone alla variazione della corrente.

Corrente indotta
Corrente che circola in un circuito chiuso per effetto di una variazione del flusso del campo magnetico che lo attraversa.

Correnti di Foucault
Correnti indotte che circolano a vortici in un pezzo di metallo massiccio attraversato da un flusso variabile; lo scaldano e, per la legge di Lenz, ne frenano il moto.

Energia del campo magnetico
Energia immagazzinata nel campo di una bobina percorsa da corrente: $U = \frac{1}{2} L I^2$, con L induttanza.

Extracorrente di apertura
Corrente dovuta all'autoinduzione quando si apre un circuito con una bobina; può far scoccare una scintilla fra i contatti.

Flusso del campo magnetico
Per una spira piana di area S in un campo uniforme: $\Phi = BS \cos\theta$, con θ angolo fra il campo e la normale alla spira. Si misura in weber.

Forza elettromotrice cinetica
F.e.m. indotta in un conduttore di lunghezza L che si muove con velocità v perpendicolare a un campo B: $f_{em} = BLv$.

Forza elettromotrice indotta
F.e.m. che nasce in un circuito quando varia il flusso del campo magnetico che lo attraversa; si misura in volt.

Freno elettromagnetico
Freno che rallenta senza contatto un conduttore in moto rispetto a dei magneti, grazie alle correnti di Foucault indotte nel conduttore.

Henry
Unità di misura dell'induttanza (H): 1 H = 1 Wb/A.

Induttanza
Coefficiente di proporzionalità fra il flusso prodotto da una bobina attraverso sé stessa e la corrente che la percorre; dipende da geometria, numero di spire e nucleo.

Induzione elettromagnetica
Fenomeno per cui una variazione del flusso del campo magnetico attraverso un circuito vi produce una f.e.m. e, se il circuito è chiuso, una corrente (Faraday, 1831).

Legge di Faraday–Neumann
La f.e.m. indotta in un circuito è uguale alla rapidità di variazione del flusso, cambiata di segno: $f_{em} = -N \Delta\Phi/\Delta t$.

Legge di Lenz
La corrente indotta ha un verso tale da opporsi, con il suo campo, alla variazione di flusso che l'ha prodotta; esprime la conservazione dell'energia.

Mutua induzione
Induzione di una f.e.m. in un circuito dovuta alla variazione della corrente in un altro circuito vicino, come nell'anello di Faraday.

Weber
Unità di misura del flusso del campo magnetico (Wb): 1 Wb = 1 T·m^2 = 1 V·s.

Soluzioni

1. B. La corrente indotta compare solo mentre il campo nell'anello cambia, cioè alla chiusura e all'apertura del circuito A; con corrente costante l'ago torna a zero.

2. A. 1 Wb = 1 T·m^2 è l'unità del flusso; il campo si misura in tesla, la f.e.m. in volt, l'induttanza in henry.

3. C. Il flusso è costante, quindi $\Delta\Phi = 0$ e per la legge di Faraday–Neumann non c'è f.e.m. indotta, qualunque sia l'intensità del campo.

4. D. Con la normale perpendicolare al campo $\theta = 90°$, $\cos\theta = 0$: le linee scorrono parallele alla spira e il flusso è nullo.

5. B. La corrente indotta si oppone alla *variazione* del flusso; il campo indotto è opposto a quello esterno solo quando il flusso aumenta.

6. A. Il moto del magnete fa variare il flusso attraverso le «spire» del tubo; le correnti indotte, per la legge di Lenz, frenano il magnete, e la sua energia diventa calore nel rame.

7. D. Sono correnti indotte, che circolano a vortici nel metallo massiccio, quando il flusso che lo attraversa cambia.

8. F. Se il magnete è fermo il flusso non cambia, e non c'è corrente indotta: la corrente compare solo durante il movimento.

9. V. Dalla definizione $\Phi = BS\cos\theta$: 1 Wb = 1 T · 1 m^2.

10. V. Per la legge di Lenz il campo indotto si oppone alla diminuzione del flusso, quindi tende a mantenerlo: ha lo stesso verso del campo esterno.

11. F. La forza magnetica sulla corrente indotta, ILB, è diretta contro la velocità e frena la sbarretta (legge di Lenz); per mantenerla in moto bisogna spingerla.

12. F. Per una bobina senza ferro l'induttanza dipende solo dalla sua geometria e dal numero di spire; il flusso è proporzionale alla corrente, ma il coefficiente non cambia.

13. $S = (0{,}12\text{ m})^2 = 1{,}44 \times 10^{-2}\text{ m}^2$. Normale parallela: $\Phi = BS = 0{,}25\text{ T} \cdot 1{,}44 \times 10^{-2}\text{ m}^2 = 3{,}6 \times 10^{-3}$ Wb. A 60°: $\Phi = BS\cos 60° = 1{,}8 \times 10^{-3}$ Wb.

14. $S = \pi\,(0{,}50\text{ m})^2 = 0{,}785\text{ m}^2$; $\Phi = BS\cos 30° = 5{,}0 \times 10^{-5}\text{ T} \cdot 0{,}785\text{ m}^2 \cdot 0{,}866 = 3{,}4 \times 10^{-5}$ Wb.

15. $|\Delta\Phi| = 2{,}0\text{ mWb} - 0{,}50\text{ mWb} = 1{,}5 \times 10^{-3}$ Wb; $|f_{em}| = N|\Delta\Phi|/\Delta t = 80 \cdot 1{,}5 \times 10^{-3}\text{ Wb}/0{,}030\text{ s} = 4{,}0$ V.

16. 1,6. $I = f_{em}/R = 4{,}0\text{ V}/2{,}5\ \Omega = 1{,}6$ A.

17. La f.e.m. è proporzionale a N: con 100 spire raddoppia, −0,30 V fra 0 e 2 s, zero fra 2 e 5 s, +0,60 V fra 5 e 6 s. Se la discesa durasse 3 s (con 50 spire) la pendenza sarebbe −6,0 mWb/3,0 s = −2,0 mWb/s e la f.e.m. $+50 \cdot 2{,}0 \times 10^{-3}$ V = +0,10 V, per un tempo triplo: il prodotto f.e.m. · durata resta 0,30 V·s.

18. $f_{em} = BL\nu = 0{,}60\text{ T} \cdot 0{,}25\text{ m} \cdot 3{,}0\text{ m/s} = 0{,}45$ V.

19. 0,90. $U = \frac{1}{2} \cdot 0{,}20\text{ H} \cdot (3{,}0\text{ A})^2 = 0{,}90$ J.

20. a) $B = \mu_0 NI/L = 4\pi \times 10^{-7}\text{ T·m/A} \cdot 1000 \cdot 2{,}0\text{ A}/0{,}50\text{ m} = 5{,}0 \times 10^{-3}$ T. b) All'inizio il campo è zero; $\Delta\Phi = \Delta B \cdot S = 5{,}03 \times 10^{-3}\text{ T} \cdot 4{,}0 \times 10^{-4}\text{ m}^2 = 2{,}0 \times 10^{-6}$ Wb. c) $|f_{em}| = 40 \cdot 2{,}01 \times 10^{-6}\text{ Wb}/0{,}10\text{ s} = 8{,}0 \times 10^{-4}\text{ V} = 0{,}80$ mV durante la salita; dopo, con la corrente costante, zero. d) È la mutua induzione dell'anello di Faraday: il circuito «primario» è il solenoide, quello «secondario» la piccola bobina, senza ferro.

21. a) $f_{em} = BL\nu = 0{,}80\text{ T} \cdot 0{,}50\text{ m} \cdot 4{,}0\text{ m/s} = 1{,}6$ V; $I = 1{,}6\text{ V}/2{,}0\ \Omega = 0{,}80$ A. b) $F = ILB = 0{,}80\text{ A} \cdot 0{,}50\text{ m} \cdot 0{,}80\text{ T} = 0{,}32$ N, nel verso del moto (equilibra la forza magnetica, che frena). c) $P_{mecc} = F\nu = 0{,}32\text{ N} \cdot 4{,}0\text{ m/s} = 1{,}28\text{ W} \approx 1{,}3$ W; $P_{el} = f_{em}I = 1{,}6\text{ V} \cdot 0{,}80\text{ A} = 1{,}28\text{ W} = RI^2$. d) $E = P\Delta t = 1{,}28\text{ W} \cdot 5{,}0\text{ s} = 6{,}4$ J.

22. $S = (0{,}10\text{ m})^2 = 1{,}0 \times 10^{-2}\text{ m}^2$, $BS = 4{,}0 \times 10^{-3}$ Wb. a) Da 0° a 90° il flusso passa da BS a 0: $\Delta\Phi = -4{,}0 \times 10^{-3}$ Wb e $f_{em} = -N\Delta\Phi/\Delta t = 20 \cdot 4{,}0 \times 10^{-3}\text{ Wb}/0{,}025\text{ s} = +3{,}2$

V. b) Da 90° a 180° il flusso passa da 0 a $-BS$ (le linee attraversano la spira dall'altra parte): $\Delta\Phi = -4{,}0 \times 10^{-3}$ Wb di nuovo, $f_{em} = +3{,}2$ V, stesso segno. Da 180° a 270° passa da $-BS$ a 0: $\Delta\Phi = +4{,}0 \times 10^{-3}$ Wb, $f_{em} = -3{,}2$ V. c) Un giro dura $4 \cdot 0{,}025$ s = 0,10 s: 10 giri al secondo. La f.e.m. ha un segno per mezzo giro e il segno opposto per l'altro mezzo: la corrente inverte il verso due volte a ogni giro. È una corrente alternata (capitolo 9).

23. a) $f_{em} = BLv = 4{,}0 \times 10^{-5}$ T $\cdot$ 60 m $\cdot$ 250 m/s = 0,60 V. b) Il filo che collega le estremità si muove con l'aereo, nello stesso campo: in esso si induce la stessa f.e.m., che nel circuito chiuso si oppone a quella delle ali. Il flusso attraverso il circuito, che viaggia rigido con l'aereo in un campo uniforme, non cambia: la f.e.m. totale nel circuito è zero e la lampadina resta spenta.

24. a) Entrando nel campo, l'area della spira immersa nel campo cresce e il flusso aumenta: la corrente indotta si oppone all'aumento, e la forza ILB sul lato inferiore, l'unico immerso nel campo fra i lati orizzontali, è diretta verso l'alto, contro il moto (le forze sui lati verticali si annullano). b) $I = BLv/R$, quindi $F = B^2L^2v/R$; ponendo $F = mg$: $v = mgR/(B^2L^2) = 0{,}020$ kg $\cdot$ 9,8 m/s^2 $\cdot$ 0,050 Ω/((0,50 T)^2 $\cdot$ (0,10 m)^2) = 3,9 m/s. c) A velocità costante l'energia cinetica non cambia: l'energia potenziale persa diventa calore nella spira per effetto Joule. Potenza: $P = mgv = 0{,}020$ kg $\cdot$ 9,8 m/s^2 $\cdot$ 3,92 m/s ≈ 0,77 W (uguale a RI^2, con I = 3,9 A).

25. Traccia di risposta. Faraday osserva che la corrente indotta nella bobina B dura solo un istante dopo la chiusura del circuito A, e poi sparisce anche se la corrente in A continua a circolare. La legge di Faraday–Neumann lo spiega: la f.e.m. indotta è proporzionale alla rapidità con cui cambia il flusso, e con corrente costante in A il flusso in B, pur grande, non cambia. Chi cercava un effetto *permanente* di un campo costante guardava l'unico caso in cui l'induzione è nulla; l'effetto si vede solo nei transitori, all'accensione e allo spegnimento, o con un magnete in moto. Si può verificare ripetendo l'esperimento con un sensore che registri la corrente in B in funzione del tempo, come nel laboratorio del capitolo.

26. L'affermazione è vera solo se il flusso aumenta, per esempio quando il polo nord si avvicina alla spira. Quando il magnete si allontana il flusso diminuisce, e il campo indotto ha lo stesso verso di quello del magnete, tanto che la spira lo attrae (Figura 8.4b). Correzione: «la corrente indotta produce un campo che si oppone alla *variazione* del flusso».

27. Traccia di risposta. Il magnete che entra in una «spira» del tubo induce una corrente che lo attirerebbe in avanti invece di frenarlo: cadrebbe più in fretta che in aria, sempre più veloce; la corrente indotta, proporzionale alla velocità, crescerebbe a sua volta, e così la spinta. Il magnete guadagnerebbe energia cinetica e il tubo si scalderebbe, senza che nessuno fornisca l'energia in più rispetto a quella gravitazionale: energia dal nulla, un moto perpetuo. Il primo principio della termodinamica lo esclude, quindi la corrente indotta deve opporsi alla variazione del flusso.

28. Traccia di risposta. a) L'induzione elettromagnetica, nella forma delle correnti di Foucault nel fondo della pentola, e il loro effetto Joule. b) La corrente variabile nella bobina produce un campo magnetico variabile; per la legge di Faraday–Neumann nel fondo metallico, conduttore, si inducono f.e.m. e correnti, che scaldano il metallo ($P = RI^2$); la frequenza elevata rende rapida la variazione del flusso e quindi intensa la f.e.m. Il vetro è un isolante: il flusso varia anche attraverso di esso, ma non vi circolano correnti, e non si scalda. Per la legge di Lenz le correnti si oppongono alla variazione che le produce. c) Collegamento: il calore nasce direttamente nella pentola, e non deve passare da una fiamma o da una resistenza al fondo; si può discutere, senza inventare cifre, come la scelta degli elettrodomestici entri nel risparmio energetico e nella transizione verso fonti elettriche rinnovabili.

29. Traccia di risposta (10–15 righe). Una corrente indotta scalda il circuito per effetto Joule, quindi trasporta energia, che deve venire da qualche parte. La legge di Lenz dice che la corrente indotta si oppone alla variazione di flusso: il magnete che cade nel tubo di rame induce sotto di sé correnti che lo respingono e sopra di sé correnti che lo attirano, e

queste forze lo frenano. Il magnete scende quasi a velocità costante e l'energia potenziale gravitazionale che perde non diventa energia cinetica, ma calore nel tubo: il bilancio torna. Se la corrente favorisse la variazione, il magnete accelererebbe sempre di più e le correnti crescerebbero senza limite: avremmo energia dal nulla, un moto perpetuo. Il segno meno della legge di Faraday–Neumann è quindi la conservazione dell'energia applicata all'induzione; lo stesso vale per la sbarretta, dove la potenza spesa per spingere è uguale alla potenza elettrica dissipata.

30. a) $|f_{em}| = N\Delta\Phi/\Delta t = 500 \cdot 4{,}0 \times 10^{-5}$ Wb/0,50 s = 0,040 V = 40 mV. b) Con $\Delta t = 0{,}050$ s la f.e.m. è dieci volte maggiore: 0,40 V. Commento: anche con un magnete e 500 spire la f.e.m. è di decine o centinaia di millivolt e dura una frazione di secondo; il flusso di un magnete attraverso una spira è piccolo, dell'ordine di 10^{-5} Wb. Per vedere l'effetto servono molte spire (la f.e.m. è proporzionale a N), movimenti rapidi e uno strumento sensibile alle correnti piccole e brevi come il galvanometro; nelle centrali la f.e.m. è grande perché si usano campi intensi, bobine con moltissime spire e rotazioni rapide e continue.