

Douglas C. Giancoli

# Fisica 2

**Elettromagnetismo - Ottica**

**Terza edizione**



**cea**

casa editrice ambrosiana

Douglas C. Giancoli

# Fisica 2

Elettromagnetismo • Ottica

Terza edizione

a cura di Stefano Ossicini

**Se vuoi accedere alle risorse online riservate**

1. Vai su **my.zanichelli.it**
2. Clicca su *Registrati*.
3. Scegli *Studente*.
4. Segui i passaggi richiesti per la registrazione.
5. Riceverai un'email: clicca sul link per completare la registrazione.
6. Cerca il tuo codice di attivazione stampato in verticale sul bollino argentato in questa pagina.
7. Inseriscilo nella tua area personale su **my.zanichelli.it**

Se sei già registrato, per accedere ai contenuti riservati ti serve solo il codice di attivazione.

**cea**

casa editrice ambrosiana

Titolo originale: *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics* (Chapters 21–35), 5th Edition by Douglas C. Giancoli  
Copyright ©: 2020, 2008, 2000, 1989, 1984 by Douglas C. Giancoli. Published by Pearson Education, Inc. All Rights Reserved.  
Authorized translation from the English language edition. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage retrieval.

© 2022, 2010, 1991 CEA – Casa Editrice Ambrosiana, viale Romagna 5, 20089 Rozzano (MI) [29994]  
CEA – Casa Editrice Ambrosiana è un marchio editoriale di Zanichelli editore S.p.A.

Traduzione: Stefano Ossicini

#### Diritti riservati

I diritti di pubblicazione, riproduzione, comunicazione, distribuzione, trascrizione, traduzione, noleggio, prestito, esecuzione, elaborazione in qualsiasi forma o opera, di memorizzazione anche digitale e di adattamento totale o parziale su supporti di qualsiasi tipo e con qualsiasi mezzo (comprese le copie digitali e fotostatiche), sono riservati per tutti i paesi. L'acquisto della presente copia dell'opera non implica il trasferimento dei suddetti diritti né li esaurisce.

#### Fotocopie e permessi di riproduzione

Le fotocopie per uso personale (cioè privato e individuale, con esclusione quindi di strumenti di uso collettivo) possono essere effettuate, nei limiti del 15% di ciascun volume, dietro pagamento alla S.I.A.E. del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Tali fotocopie possono essere effettuate negli esercizi commerciali convenzionati S.I.A.E. o con altre modalità indicate da S.I.A.E.

Per le riproduzioni ad uso non personale (ad esempio: professionale, economico, commerciale, strumenti di studio collettivi, come dispense e simili) l'editore potrà concedere a pagamento l'autorizzazione a riprodurre un numero di pagine non superiore al 15% delle pagine del presente volume.

Le richieste vanno inoltrate a:  
Centro Licenze e Autorizzazioni per le Riproduzioni Editoriali (CLEARedi),  
Corso di Porta Romana 108, 20122 Milano  
e-mail: [autorizzazioni@clearedi.org](mailto:autorizzazioni@clearedi.org) e sito web: [www.clearedi.org](http://www.clearedi.org)

L'autorizzazione non è concessa per un limitato numero di opere di carattere didattico riprodotte nell'elenco che si trova all'indirizzo  
[www.zanichelli.it/chi-siamo/fotocopie-e-permessi](http://www.zanichelli.it/chi-siamo/fotocopie-e-permessi)

L'editore, per quanto di propria spettanza, considera rare le opere fuori del proprio catalogo editoriale. La loro fotocopia per i soli esemplari esistenti nelle biblioteche è consentita, anche oltre il limite del 15%, non essendo concorrenziale all'opera. Non possono considerarsi rare le opere di cui esiste, nel catalogo dell'editore, una successiva edizione, né le opere presenti in cataloghi di altri editori o le opere antologiche.  
Nei contratti di cessione è esclusa, per biblioteche, istituti di istruzione, musei e archivi, la facoltà di cui all'art. 71-ter legge diritto d'autore.  
Per permessi di riproduzione, diversi dalle fotocopie, rivolgersi a [segreteria\\_cea@ceaedizioni.it](mailto:segreteria_cea@ceaedizioni.it)

#### Licenze per riassunto, citazione e riproduzione parziale a uso didattico con mezzi digitali

La citazione, la riproduzione e il riassunto, se fatti con mezzi digitali, sono consentiti (art. 70 bis legge sul diritto d'autore), limitatamente a brani o parti di opera, a) esclusivamente per finalità illustrative a uso didattico, nei limiti

di quanto giustificato dallo scopo non commerciale perseguito. (La finalità illustrativa si consegue con esempi, chiarimenti, commenti, spiegazioni, domande, nel corso di una lezione); b) sotto la responsabilità di un istituto di istruzione, nei suoi locali o in altro luogo o in un ambiente elettronico sicuro, accessibili solo al personale docente di tale istituto e agli alunni o studenti iscritti al corso di studi in cui le parti di opere sono utilizzate; c) a condizione che, per i materiali educativi, non siano disponibili sul mercato licenze volontarie che autorizzano tali usi.

Zanichelli offre al mercato due tipi di licenze di durata limitata all'anno accademico in cui le licenze sono concesse:

A) licenze gratuite per la riproduzione, citazione o riassunto di una parte di opera non superiore al 5%. Non è consentito superare tale limite del 5% attraverso una pluralità di licenze gratuite,

B) licenze a pagamento per la riproduzione, citazione, riassunto parziale maggiore al 5% e comunque inferiore al 40% dell'opera.

Per usufruire di tali licenze occorre seguire le istruzioni

su [www.zanichelli.it/licenzeeducative](http://www.zanichelli.it/licenzeeducative)

L'autorizzazione è strettamente riservata all'istituto educativo licenziatario e non è trasferibile in alcun modo e a qualsiasi titolo.

#### Garanzie relative alle risorse digitali

Le risorse digitali di questo volume sono riservate a chi acquista un volume nuovo: vedi anche al sito

[www.zanichelli.it/contatti/acquisti-e-recesso](http://www.zanichelli.it/contatti/acquisti-e-recesso) le voci *Informazioni generali su risorse collegate a libri cartacei e Risorse digitali e libri non nuovi*.

Zanichelli garantisce direttamente all'acquirente la piena funzionalità di tali risorse.

In caso di malfunzionamento rivolgersi a [assistenza@zanichelli.it](mailto:assistenza@zanichelli.it)

La garanzia di aggiornamento è limitata alla correzione degli errori e all'eliminazione di malfunzionamenti presenti al momento della creazione dell'opera. Zanichelli garantisce inoltre che le risorse digitali di questo volume sotto il suo controllo saranno accessibili, a partire dall'acquisto, per tutta la durata della normale utilizzazione didattica dell'opera. Passato questo periodo, alcune o tutte le risorse potrebbero non essere più accessibili o disponibili: per maggiori informazioni, leggi [my.zanichelli.it/fuoricatalogo](http://my.zanichelli.it/fuoricatalogo)

#### Soluzioni degli esercizi e altri svolgimenti di compiti assegnati

Le soluzioni degli esercizi, compresi i passaggi che portano ai risultati e gli altri svolgimenti di compiti assegnati, sono tutelate dalla legge sul diritto d'autore in quanto elaborazioni di esercizi a loro volta considerati opere creative tutelate, e pertanto non possono essere diffuse, comunicate a terzi e/o utilizzate economicamente, se non a fini esclusivi di attività didattica.

#### Diritto di TDM

L'estrazione di dati da questa opera o da parti di essa e le attività connesse non sono consentite, salvi i casi di utilizzazioni libere ammessi dalla legge. L'editore può concedere una licenza. La richiesta va indirizzata a [tadm@zanichelli.it](mailto:tadm@zanichelli.it)

Realizzazione editoriale: Epitesto, Milano

Copertina:

- progetto grafico: Anchora, Milano

- realizzazione: Sara Travella/GALLINE A POIS, Milano

- immagine di copertina: © bortonia/iStockphoto

Prima edizione italiana: gennaio 1991

Seconda edizione italiana: gennaio 2010

Terza edizione italiana: novembre 2022

Ristampa: **prima tiratura**

5    4    3    2    1                    2022    2023    2024    2025    2026

Realizzare un libro è un'operazione complessa, che richiede numerosi controlli: sul testo, sulle immagini e sulle relazioni che si stabiliscono tra loro. L'esperienza suggerisce che è praticamente impossibile pubblicare un libro privo di errori. Saremo quindi grati ai lettori che vorranno segnalarceli.

Per segnalazioni o suggerimenti relativi a questo libro rivolgersi a: CEA – Casa Editrice Ambrosiana  
viale Romagna 5, 20089 Rozzano (MI)  
fax 02 52202260 e-mail: [segreteria\\_cea@ceaedizioni.it](mailto:segreteria_cea@ceaedizioni.it)

Stampa: Grafica Ragno  
Via Lombardia 25, 40064 Tolara di Sotto, Ozzano Emilia (Bologna)  
per conto di Zanichelli editore S.p.A.  
Via Innerio 34, 40126 Bologna

# Indice generale

<b>Indice delle applicazioni</b>	VII	*22.4 Basi sperimentali delle leggi di Gauss e Coulomb	55
<b>Prefazione</b>	IX	<b>Sommario</b>	56
<b>Note sull'uso dei colori</b>	XII	<b>Quesiti</b>	56
		<b>Quesiti e convinzioni errate</b>	57
		<b>Problemi</b>	58
		<b>Problemi generali</b>	62
<b>21 Carica elettrica e campo elettrico</b>	<b>1</b>	<b>23 Potenziale elettrico</b>	<b>65</b>
21.1 Elettricità statica; carica elettrica e sua conservazione	2	23.1 Energia potenziale elettrica e differenza di potenziale	66
21.2 Cariche elettriche nell'atomo	3	23.2 Relazione tra potenziale elettrico e campo elettrico	70
21.3 Isolanti e conduttori	3	23.3 Potenziale elettrico generato da cariche puntiformi	73
21.4 Carica indotta; l'elettroscopio	4	23.4 Potenziale elettrico generato da distribuzioni qualsiasi di carica	76
21.5 Legge di Coulomb	5	23.5 Linee e superfici equipotenziali	78
21.6 Campo elettrico	12	23.6 Potenziale del dipolo elettrico; momento di dipolo	79
■ Guida alla risoluzione dei problemi <i>Elettrostatica: forze elettriche e campi elettrici</i>	16	23.7 Come ricavare $\vec{E}$ da $V$	80
21.7 Calcolo del campo elettrico generato da distribuzioni continue di carica	17	23.8 Energia potenziale elettrostatica; l'elettronvolt	82
21.8 Linee di forza del campo elettrico	22	23.9 Digitale, numeri binari, segnali di tensione	84
21.9 Campo elettrico e conduttori	23	*23.10 Monitor del televisore e del computer	88
21.10 Moto di una particella carica in un campo elettrico	25	*23.11 Elettrocardiogramma (ECG)	92
21.11 Dipolo elettrico	26	<b>Sommario</b>	93
*21.12 Forze elettriche in biologia molecolare; struttura del DNA e sua replicazione	29	<b>Quesiti</b>	94
<b>Sommario</b>	31	<b>Quesiti e convinzioni errate</b>	95
<b>Quesiti</b>	32	<b>Problemi</b>	96
<b>Quesiti e convinzioni errate</b>	33	<b>Problemi generali</b>	100
<b>Problemi</b>	34		
<b>Problemi generali</b>	39		
<b>22 Legge di Gauss</b>	<b>43</b>	<b>Capacità, dielettrici, immagazzinamento dell'energia elettrica</b>	<b>103</b>
22.1 Flusso del campo elettrico	44	24.1 Condensatore	103
22.2 Legge di Gauss	46	24.2 Calcolo della capacità	105
22.3 Applicazioni della legge di Gauss	48	24.3 Condensatori in serie e in parallelo	109
■ Guida alla risoluzione dei problemi <i>Legge di Gauss per distribuzioni simmetriche di carica</i>	54	24.4 Immagazzinamento dell'energia elettrica	113

24.5	Dielettrici	116
*24.6	Descrizione del dielettrico a livello molecolare	119
	Sommario	122
	Quesiti	122
	Quesiti e convinzioni errate	123
	Problemi	124
	Problemi generali	129

## **25 Correnti elettriche e resistenza** 133

25.1	Batteria elettrica	134
25.2	Corrente elettrica	136
25.3	Legge di Ohm: resistenza e resistori	139
25.4	Resistività	142
25.5	Potenza elettrica	145
25.6	Potenza negli impianti domestici	148
25.7	Corrente alternata	150
25.8	Aspetti microscopici della corrente elettrica	153
*25.9	Superconduttività	157
*25.10	Conduzione elettrica nel sistema nervoso umano	158
	Sommario	161
	Quesiti	162
	Quesiti e convinzioni errate	163
	Problemi	164
	Problemi generali	167

## **26 Circuiti in corrente continua** 171

26.1	Forza elettromotrice e tensione tra i terminali	172
26.2	Resistori in serie e in parallelo	174
26.3	Leggi di Kirchhoff	180
	■ Guida alla risoluzione dei problemi <i>Leggi di Kirchhoff</i>	182
26.4	Forze elettromotrici in serie e in parallelo; il caricabatterie	184
26.5	Circuiti RC; circuiti con resistori e condensatori in serie	187
26.6	Rischi legati all'elettricità e sicurezza	193
26.7	Amperometro e voltmetro. Le misure influenzano le quantità misurate	197
	Sommario	201
	Quesiti	202
	Quesiti e convinzioni errate	203
	Problemi	205
	Problemi generali	210

## **27 Magnetismo** 215

27.1	Magneti e campi magnetici	216
27.2	Le correnti elettriche producono campi magnetici	218
27.3	Forza su una corrente elettrica in un campo magnetico; definizione di $\vec{B}$	219
27.4	Forza agente su una carica elettrica in moto in presenza di un campo magnetico	223
	■ Guida alla risoluzione dei problemi <i>Campi magnetici</i>	227
27.5	Momento meccanico agente su una spira percorsa da corrente; momento di dipolo magnetico	229
27.6	Applicazioni: motori, altoparlanti, galvanometri	232
27.7	Scoperta e proprietà dell'elettrone	234
27.8	Effetto Hall	237
27.9	Spettrometro di massa	238
	Sommario	240
	Quesiti	240
	Quesiti e convinzioni errate	242
	Problemi	243
	Problemi generali	248

## **28 Sorgenti del campo magnetico** 251

28.1	Campo magnetico generato da un lungo filo rettilineo percorso da corrente	251
28.2	Forza tra due fili conduttori paralleli percorsi da corrente	253
28.3	Definizione delle unità di misura ampere e coulomb	255
28.4	Legge di Ampère	256
	■ Guida alla risoluzione dei problemi <i>Legge di Ampère</i>	261
28.5	Campo magnetico generato da solenoidi rettilinei e toroidali	261
28.6	Legge di Biot-Savart	264
28.7	Campo magnetico originato da una singola carica in movimento	267
28.8	Materiali magnetici: ferromagnetismo	268
28.9	Elettromagneti e solenoidi: applicazioni	270
28.10	Campi magnetici nei materiali magnetici; fenomeni di isteresi	271
*28.11	Paramagnetismo e diamagnetismo	273
	Sommario	274
	Quesiti	275
	Quesiti e convinzioni errate	276
	Problemi	278
	Problemi generali	283

<b>29</b>	<b>Induzione elettromagnetica e legge di Faraday</b>	287		
29.1	Forza elettromotrice indotta	288		
29.2	Legge di Faraday dell'induzione elettromagnetica e legge di Lenz	289		
	■ Guida alla risoluzione dei problemi Legge di Lenz	293		
29.3	Forza elettromotrice indotta in un conduttore in moto	295		
29.4	Generatori elettrici	298		
29.5	Forza controelettromotrice e contromomento torcente; correnti di Foucault	300		
29.6	Trasformatori e linee di trasmissione	303		
29.7	Un flusso di campo magnetico variabile produce un campo elettrico	307		
*29.8	Archiviazione delle informazioni: memorie magnetiche e memorie a semiconduttore	309		
*29.9	Applicazioni dell'induzione elettromagnetica	312		
	Sommario	314		
	Quesiti	314		
	Quesiti e convinzioni errate	316		
	Problemi	317		
	Problemi generali	322		
<b>30</b>	<b>Induttanza, oscillazioni elettromagnetiche e circuiti in corrente alternata</b>	325		
30.1	Mutua induttanza	326		
30.2	Autoinduttanza, induttori	328		
30.3	Energia immagazzinata in un campo magnetico	331		
30.4	Circuiti <i>RL</i>	332		
30.5	Circuiti <i>LC</i> e oscillazioni elettromagnetiche	336		
30.6	Oscillazioni <i>LC</i> con resistenza (circuito <i>RLC</i> )	338		
30.7	Circuiti in corrente alternata con generatore di corrente alternata e reattanza	340		
30.8	Serie <i>RLC</i> con generatore di corrente alternata, fasori	345		
30.9	Risonanza in un circuito a corrente alternata	348		
30.10	Adattamento di impedenza	349		
*30.11	Corrente alternata trifase	350		
	Sommario	350		
	Quesiti	351		
	Quesiti e convinzioni errate	352		
	Problemi	353		
	Problemi generali	357		
<b>31</b>	<b>Equazioni di Maxwell e onde elettromagnetiche</b>	361		
31.1	Campi magnetici generati da campi elettrici variabili; corrente di spostamento	362		
31.2	Legge di Gauss per il magnetismo	366		
31.3	Equazioni di Maxwell	367		
31.4	Produzione di onde elettromagnetiche	368		
31.5	Onde elettromagnetiche e derivazione della loro velocità dalle equazioni di Maxwell	371		
31.6	Luce come onda elettromagnetica e spettro elettromagnetico	375		
31.7	Misura sperimentale della velocità della luce	379		
31.8	Energia trasportata dalle onde elettromagnetiche; il vettore di Poynting	380		
31.9	Pressione di radiazione	383		
31.10	Radio e televisione; comunicazioni senza fili	385		
	Sommario	389		
	Quesiti	389		
	Quesiti e convinzioni errate	390		
	Problemi	391		
	Problemi generali	393		
<b>32</b>	<b>Luce: riflessione e rifrazione</b>	397		
32.1	Modello a raggi della luce	398		
32.2	Riflessione: formazione di immagini da uno specchio piano	398		
32.3	Formazione di immagini da specchi sferici	403		
32.4	Vedersi in uno specchio ingranditore (concavo)	409		
32.5	Specchi (retrovisori) convessi	411		
32.6	Indice di rifrazione	412		
32.7	Rifrazione e legge di Snell	413		
32.8	Spettro visibile e dispersione	416		
32.9	Riflessione totale interna; fibre ottiche	418		
*32.10	Rifrazione su una superficie sferica	420		
	Sommario	423		
	Quesiti	424		
	Quesiti e convinzioni errate	425		
	Problemi	426		
	Problemi generali	431		

**33 Lenti e strumenti ottici** 435

33.1	Lenti sottili, diagrammi a raggi e lunghezza focale	436
33.2	Equazione delle lenti sottili e ingrandimento	439
	■ Guida alla risoluzione dei problemi <i>Lenti sottili</i>	441
33.3	Combinazioni di lenti	444
33.4	Equazione del costruttore di lenti	446
33.5	Macchine fotografiche a pellicola e digitali	449
33.6	Occhio umano e lenti correttive	456
33.7	Lente di ingrandimento	459
33.8	Telescopio	462
33.9	Microscopio composto	465
33.10	Aberrazione delle lenti e degli specchi	466
	Sommario	468
	Quesiti	468
	Quesiti e convinzioni errate	470
	Problemi	471
	Problemi generali	476

**34 Natura ondulatoria della luce: interferenza** 479

34.1	Onde e particelle, principio di Huygens e diffrazione	480
34.2	Principio di Huygens e legge della rifrazione; miraggi	481
34.3	Interferenza: esperimento di Young delle due fenditure	483
*34.4	Interferenza da due fenditure e intensità della luce	487
34.5	Interferenza da film sottili	491
	■ Guida alla risoluzione dei problemi <i>Interferenza</i>	496
34.6	Interferometro di Michelson	497
34.7	Polarizzazione	498
*34.8	Schermi a cristalli liquidi (LCD)	502
*34.9	Diffusione della luce nell'atmosfera	504
34.10	Luminosità: lumen e intensità luminosa	505
*34.11	Efficienza delle lampadine	506
	Sommario	507
	Quesiti	507
	Quesiti e convinzioni errate	508
	Problemi	509
	Problemi generali	513

**35 Diffrazione** 517

35.1	Diffrazione da una singola fenditura o attorno a un disco	518
*35.2	Intensità della luce nella figura di diffrazione di una singola fenditura	521
*35.3	Diffrazione nell'esperimento delle due fenditure	524
35.4	Interferenza e diffrazione	526
35.5	Limiti di risoluzione: aperture circolari	527
35.6	Risoluzione dei telescopi e dei microscopi: il limite della lunghezza d'onda	529
35.7	Risoluzione dell'occhio umano e ingrandimento utile	531
35.8	Reticoli di diffrazione	532
35.9	Spettrometri e spettroscopia	535
*35.10	Ampiezza di picco e potere risolutivo di un reticolo di diffrazione	537
35.11	Raggi X e diffrazione dei raggi X	539
*35.12	Diagnostica per immagini a raggi X e tomografia computerizzata (TC)	541
*35.13	Microscopi speciali e contrasto	544
	Sommario	545
	Quesiti	545
	Quesiti e convinzioni errate	546
	Problemi	547
	Problemi generali	551

**Appendici**

<b>A</b>	Formule matematiche	A-1
<b>B</b>	Derivate e integrali	A-7
<b>C</b>	Integrazione numerica	A-9
<b>D</b>	Forza gravitazionale prodotta da una distribuzione di massa sferica	A-12
<b>E</b>	Le equazioni di Maxwell in forma differenziale	A-15

Fonti delle illustrazioni	C-1
Indice analitico	I-1
Tavole	T-1



# Indice delle applicazioni

L'asterisco indica le novità di questa edizione.

## Capitolo 21

### Biologia e medicina

All'interno di una cellula: teoria cinetica e forze elettrostatiche	29
Struttura del DNA, replicazione	29, 39

### Ingegneria, ambiente e vita quotidiana

Elettricità statica	1, 2, 33, 39
Fotocopiatrici e stampanti	13
Schermo elettrostatico, sicurezza	24

## Capitolo 23

### Biologia e medicina

Elettrocardiogramma (ECG)	65, 92
Dipoli in biologia molecolare	80
Battito cardiaco, processo di depolarizzazione	92

### Ingegneria, ambiente e vita quotidiana

Differenze di potenziali comuni da $10^{-4}$ a $10^3$ V	69
Tensione di rottura	72
Parafulmini	72
*Tensione di alimentazione, segnale di tensione	84
*Digitale, bit, byte, numeri binari	84
*Codice Morse	84
*Convertitori da analogico a digitale (ADC)	85
*Bit-rate, trasmissione TV	85, 87, 92
*Compressione dei dati, jpeg	86
*Errore di quantizzazione	85
*Frequenza di campionamento, profondità di bit	85
*Convertitori da digitale ad analogico (DAC)	86
*Larghezza di banda	86
*Rumore, capovolgimenti di bit	87
*Correzione di errori digitali, bit di parità	88
*Tasso di errore di bit	88
*Rapporto segnale/rumore	88
*Monitor del televisore e del computer	88
*TV digitali, pixel, subpixel	88
*Schermi piatti, HD	90
*Indirizzamento dei pixel	90
*Flusso di dati	91

*Matrice attiva, TFT, linee di dati	91
*Frequenza di aggiornamento TV	92
Oscilloscopio	92
*Codice ASCII	99
*Fotocellule	100

## Capitolo 24

### Biologia e medicina

Scossa da condensatore, ustioni	116
Defibrillatore cardiaco	116, 127

### Ingegneria, ambiente e vita quotidiana

Fulmine	101, 132
Condensatori utilizzati come alimentazione di riserva, protettori di tensione, memorie	103, 106
Microfono a condensatore	107
Tasto del computer	106
Energia del flash della fotocamera	113
Depuratore d'aria elettrostatico	125
Misurare piccole distanze	125
Cavo coassiale	129
*Memoria dinamica ad accesso casuale (DRAM)	131

## Capitolo 25

### Biologia e medicina

Conduzione elettrica nel sistema nervoso umano, neuroni	158
Potenziale d'azione	159

### Ingegneria, ambiente e vita quotidiana

Costruzione di batterie, terminali	135
*Macchine elettriche	136, 168
Collegare una batteria	138, 142
Cavi di collegamento agli altoparlanti	143
Apparecchi elettrici	145
Termometro a resistenza	145
Fulmine	147
Impianti domestici, cortocircuiti	128
Fusibili, interruttori automatici	148
Sicurezza - surriscaldamento dei cavi elettrici	148
Prolunghe e possibili pericoli	150
Asciugacapelli	152
Estensimetro	170

## Capitolo 26

### Biologia e medicina

*Applicazione del cellulare per misurare la glicemia	171
Pacemaker cardiaco	193
Rischi per l'uomo legati all'elettricità	193
Fibrillazione ventricolare	194
Elettrocardiogramma	211

### Ingegneria, ambiente e vita quotidiana

Ventilatore a due velocità	178
Ricarica per batterie d'automobile	184
*Avviamento d'emergenza dell'automobile	185
RC: dente di sega, segnalatori, tergicristalli	193, 213
Surriscaldamento dei cavi elettrici	193
Messa a terra adeguata, spine della corrente	195
Correnti di dispersione	196
Cavi d'alta tensione a terra	197
Fusibili	197
Amperometri, voltmetri, ohmmetri	197
Come usare voltmetri e amperometri, correzioni	199, 214
*Influenza delle misure sulle grandezze misurate	200
Partitore di tensione	206
Pannelli solari	211
Potenzimetro e circuiti a ponte	210
Corrosione della batteria dell'automobile	213
Convertitori da digitale ad analogico (DAC)	213

## Capitolo 27

### Biologia e medicina

Pompaggio elettromagnetico del sangue	241
Velocità del flusso sanguigno, effetto Hall	247

### Ingegneria, ambiente e vita quotidiana

Usare una bussola	217
Inclinazione magnetica	217
Mappe e Nord reale	218



Aurora boreale	227
Motori elettrici, a corrente continua e alternata	233
Altoparlanti e cuffie	234

**Capitolo 28****Ingegneria, ambiente e vita quotidiana**

Cavo coassiale	259, 280
Solenoidi come interruttori: campanello, motorino di avviamento dell'automobile	271
Interruttori magnetici	271
Relè (magnetico)	275

**Capitolo 29****Biologia e medicina**

Misura elettromagnetica del flusso sanguigno	296
--	-----

**Ingegneria, ambiente e vita quotidiana**

Fornello a induzione	293
Generatori, centrali elettriche	298
Alternatori nelle automobili	300
Sovraccarico di un motore	301
Smorzamento delle correnti di Foucault	302, 315
Metal detector dell'aeroporto	302
Trasformatori, linee di trasmissione	303
Caricatori dei cellulari	304
Sistema di accensione dell'automobile	305
*Trasmissione di energia senza fili	306
Ricarica per induzione	306
Archiviazione magnetica delle informazioni	309
*Memorie a semiconduttore	310
*RAM, DRAM	311
*Bit-line e Word-line	311
*Memoria scritta e letta	311
*Memoria volatile e non	312
*Memoria flash, MOSFET, MRAM	311
Microfono	312
Lettore di carte di credito	312
Sismografo	312
Interruttore salvavita	313
Cavi schermati	315
Riciclare materiale solido	315

**Capitolo 30****Ingegneria, ambiente e vita quotidiana**

*Ricarica a induzione per automobili	325
Cavo coassiale	330

Limitatore di sovratensione	335
Condensatori come filtri	344, 359, 360
Altoparlanti a due vie	344
Adattamento di impedenza	349
Corrente alternata trifase	350
Fattore Q	358
Circuiti utilizzati come filtri	359

**Capitolo 31****Biologia e medicina**

Pinzette ottiche	385, 393
------------------	----------

**Ingegneria, ambiente e vita quotidiana**

*TV dalla Luna	361, 388, 394
Dispositivi senza fili, trasmissione	361, 385
Antenne	378, 387
Scarto temporale delle telefonate	378
*Vela solare	384, 395
Radio e TV	385
AM e FM	396
Telefoni cellulari, telecomandi, TV via cavo e satellitare	388
*GPS	394
Uso dell'energia solare	394

**Capitolo 32****Biologia e medicina**

Endoscopio, broncoscopio e colonscopio medici	420
---	-----

**Ingegneria, ambiente e vita quotidiana**

Altezza di uno specchio (concavo) per specchiarsi completamente	401
Specchi retrovisori (convessi)	411
Illusioni ottiche	413
Profondità apparente dell'acqua	415
Arcobaleni	417, 433
Colori sott'acqua	417
Brillantezza del diamante	419
Prismi dei binocoli	419
Cavi a fibra ottica	418, 430, 433
*"Trading ad alta frequenza", intercettazione	420
Fornello solare	427
Rilevatore del livello d'acqua in una lavatrice	433
Riflettori stradali	434

**Capitolo 33****Biologia e medicina**

Occhio umano	456
Fovea e coni	456
Visione lontana e vicina	456
Lenti correttive	457, 469
Lenti a contatto	458

Vedere sott'acqua	458
Luce dei microscopi	464

**Ingegneria, ambiente e vita quotidiana**

Camere fotografiche a pellicola e digitali	449
*CCD, CMOS, sensori, diagramma di energia potenziale	449
*Pixel di Bayer, Foveon	449
Artefatti digitali	450
Regolazione della macchina fotografica, apertura del diaframma (f-stop)	450
*Risoluzione, compressione, JPEG, dati grezzi	453
Teleobiettivo, grandangolo	455
Zoom ottico vs. zoom digitale	455
Lenti di ingrandimento	459
Telescopi	462
*Microscopi	464
Aberrazione delle lenti	466
Proiettore	472
Stenoscopio	473

**Capitolo 34****Ingegneria, ambiente e vita quotidiana**

Bolle di sapone, strati d'olio, colori	479, 491
Miraggi sulla strada	482
Lenti trattate	496
Occhiali da sole polarizzati	500
Schermi a cristalli liquidi, TV e schermi dei computer	502
Colori del cielo	504
*Efficienza delle lampadine, LED	506
Microscopi	506
Rivestimento antiriflesso Stealth	513
CD bits, buchi e terre	515

**Capitolo 35****Biologia e medicina**

Risoluzione dell'occhio	529, 531
Ingrandimento utile	531
Spettroscopia in biologia	535
Diffrazione a raggi X in biologia	540
Diagnostica per immagini: raggi X e tomografia computerizzata (TC)	541
*Microscopio interferenziale	544
*Microscopio a contrasto di fase	545

**Ingegneria, ambiente e vita quotidiana**

Telescopio spaziale Hubble	528
Risoluzione del telescopio e del microscopio	529
Raggi X	539
Tomografia	539

# Prefazione

## ■ **Novità!**

1. **Quesiti e convinzioni errate**, in numero di 10 o 15 alla fine di ogni capitolo. I test a risposta multipla comprendono risposte errate e risposte corrette. Infatti, dal punto di vista dell'apprendimento, chiedere a chi studia di riflettere, di considerare le opzioni, si rivela più efficace che dirgli semplicemente cosa è giusto e cosa è sbagliato. (Si tratta di quesiti che si aggiungono alle domande di apertura del capitolo.)
2. **Tutto intorno a noi è digitale**. Eppure, il termine "digitale" non sempre è usato in modo appropriato. In questa nuova edizione sono state aggiunte 20 pagine di spiegazione dei fondamenti. Numeri binari, bit e byte vengono introdotti nel Capitolo 23, insieme alla conversione da analogico a digitale (ADC), e viceversa, all'audio digitale e al funzionamento dei monitor. Vengono inoltre affrontati temi come la compressione delle informazioni, la frequenza di campionamento, la profondità di bit, l'indirizzamento dei pixel e, nei capitoli finali, l'archiviazione delle informazioni (RAM, DRAM, flash), le fotocamere digitali e relativi sensori (CCD, CMOS).
3. **Campo magnetico di una singola carica in movimento**, argomento trattato raramente (e se lo è, forse in modo non chiaro) che dimostra la necessità della teoria della relatività.
4. **Vedersi in uno specchio ingranditore** (concavo), ingrandimento angolare e immagini sfocate con paradosso. Inoltre, specchi convessi (retrovisori) (Capitolo 32).
5. **Efficienza delle lampadine** (Capitolo 34).
6. **Arricchito con nuovi problemi**, nuove domande e quesiti e convinzioni errate (*vedi* sopra, punto 1).
7. Molti **nuovi esempi** concettuali.
8. **Più passaggi matematici** compresi nelle derivazioni e negli esempi.
9. **Nuove unità di misura** del Sistema Internazionale (Capitolo 21, Tavole).
10. La **fisica moderna** nei capitoli classici del volume (a volte nei Problemi): quark (Capitolo 21); modello a goccia d'acqua, contatore Geiger, generatore di Van de Graaff (Capitolo 23); transistor (Capitoli 23 e 29); isotopi, ciclotrone (Capitolo 27); MOSFET (Capito-

lo 29); semiconduttore (sensore della fotocamera), fotone (Capitolo 33); spettri a righe, cristallografia a raggi X (Capitolo 35).

11. **Simmetria** ovunque.

12. **Nuove applicazioni:**

- Sicurezza durante l'avviamento di emergenza di un'automobile (Capitolo 26)
- Efficienza delle lampadine (Capitolo 34)
- Microscopi speciali e contrasto (Capitolo 35)
- Carica induttiva (Capitolo 29)
- Partitore di tensione (Capitolo 26)
- Televisori a schermo piatto (Capitoli 23 e 34)
- Elettrocardiogramma (Capitolo 23)
- Trasmissione wireless dalla Luna, inimmaginabile! (Capitolo 31)
- Automobili elettriche (Capitolo 25)
- Il digitale (Capitoli 23, 29 e 33) comprende (oltre a quanto già riportato al punto 2) errore di quantizzazione, correzione dell'errore digitale, rumore, tasso di errore di bit, flusso di dati della TV digitale, frequenza di aggiornamento, matrice attiva, transistor a film sottile, memoria digitale, bit-line, lettura e scrittura di celle di memoria (MOSFET), *floating gate*, memoria volatile e non volatile, codici Bayer, JPEG, ASCII e altro.

## ■ **Guardare il mondo con occhi che si intendono di fisica**

Ho voluto scrivere un libro di testo diverso da tutti gli altri, che presentano la fisica come un insieme di fatti, quasi un catalogo. Invece di iniziare la trattazione in modo formale e dogmatico, ho cercato di introdurre ogni argomento con osservazioni ed esperienze della vita di tutti i giorni, partendo dalle peculiarità del mondo reale, per passare poi alle generalizzazioni e agli aspetti più formali della fisica, dimostrando perché crediamo in ciò in cui crediamo. Questo approccio rispecchia il modo in cui la scienza viene di fatto praticata.

L'obiettivo è quello di offrire a chi studia una conoscenza approfondita dei concetti base della fisica in tutti i suoi aspetti. Altrettanto importante è mostrare quanto sia utile la fisica nella vita quotidiana e nella professione che si intraprenderà, presentando le sue applicazioni alla

biologia, alla medicina, all'ingegneria e all'architettura, per citare solo alcuni ambiti.

Molto impegno è stato dedicato a illustrare le tecniche che permettono di risolvere i problemi attraverso esempi concettuali e paragrafi specificatamente dedicati alle strategie di problem solving.

Per qualcuno la matematica può rappresentare un ostacolo. Così, ho cercato di includere tutti i passaggi. Importanti strumenti matematici, come la somma e il prodotto di vettori, sono introdotti nel testo laddove il contesto lo richiede e non in un capitolo introduttivo di ardua lettura. Nelle *Appendici* vengono presentati la matematica di base, derivate e integrali, oltre ad alcuni argomenti più complessi come l'integrazione numerica, il campo gravitazionale della distribuzione sferica di massa, le equazioni di Maxwell in forma differenziale e una tabella che riporta alcuni isotopi nucleari (accuratamente aggiornati, così come lo sono la tavola periodica e le costanti fondamentali riportate nelle *Tavole* in fondo al libro).

Il volume affronta senza dubbio più argomenti di quelli che possono essere trattati nei singoli corsi universitari, offrendo una grande flessibilità. Le sezioni contrassegnate con un asterisco (\*) si possono considerare facoltative, poiché presentano temi più complessi o argomenti solitamente non trattati. In un corso breve si può pensare di eliminare tutto il materiale facoltativo, così come gran parte dei Capitoli 26, 30 e 35 e parti selezionate del Capitolo 33. Gli argomenti non trattati a lezione possono rappresentare una risorsa preziosa per gli studenti per lo studio individuale e nel corso degli anni.

## ■ L'Autore

Douglas C. Giancoli ha conseguito la laurea (*Bachelor of Arts*) in Fisica all'Università della California a Berkeley con il massimo dei voti (*summa cum laude*). Ha ottenuto il Master of Science in Fisica al MIT e il dottorato (PhD) in Fisica delle particelle elementari di nuovo a Berkeley. Ha lavorato due anni come membro interno del laboratorio microbiologico (ricerca sui virus), sviluppando competenze in biologia molecolare e in biofisica.

Tra i suoi mentori si possono annoverare i premi Nobel Emilio Segré e Donald Glaser.

Ha tenuto molti corsi universitari, di taglio sia tradizionale sia innovativo, e continua ad aggiornare meti-



colosamente i propri libri di testo, pensando sempre a come offrire agli studenti una migliore comprensione della fisica.

Nel tempo libero ama le attività all'aperto e in particolare pratica l'alpinismo. Sostiene che scalare una vetta sia come imparare la fisica: richiede sforzo, ma la ricompensa è grande.

## ■ A chi studia

### Come studiare

1. **Leggi il capitolo.** Impara i concetti e le notazioni. Prova a rispondere ai quesiti e a risolvere gli esercizi proposti. Segui attentamente i passaggi degli esempi concettuali e delle derivazioni. Non perdere tempo a guardare uno schermo, la carta è migliore dei pixel quando si tratta di imparare e pensare.
2. **Partecipa a tutte le lezioni.** Ascolta. Prendi appunti. Poni delle domande (tutti vorrebbero farlo, ma forse tu ne avrai il coraggio). Potrai sfruttare meglio la lezione se prima avrai letto il relativo capitolo.
3. **Leggi di nuovo il capitolo,** prestando attenzione ai dettagli. Segui derivazioni ed esempi concettuali. Cerca di comprenderne la logica. Risolvi il maggior numero di esercizi possibile e rispondi ai quesiti e ai "Quesiti e convinzioni errate" di fine capitolo.
4. **Risolvi da 10 a 20 dei problemi** presenti alla fine del capitolo. Risolvendo i problemi capirai quello che hai imparato e quello che non hai ancora appreso bene. Parlane con i tuoi colleghi. Risolvere i problemi è uno dei modi migliori per imparare. Non cercare solo la formula che serve per la soluzione, potrebbe essere quella sbagliata.




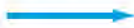











### Note sul formato e sulla risoluzione dei problemi

1. I paragrafi contrassegnati da un asterisco (\*) sono da considerare **facoltativi**. Possono essere tralasciati senza che si perda il filo logico del discorso. Nessun argomento successivo, a parte eventuali altri paragrafi facoltativi, dipende dal loro apprendimento. Tieni conto però che questi paragrafi potrebbero essere interessanti e piacevoli da leggere.
2. Nel testo si utilizzano le **convenzioni** usuali: i simboli per le grandezze (per esempio  $m$  per la massa) sono in corsivo, mentre le unità di misura (come m per metro) sono in tondo. I simboli relativi ai vettori portano una freccetta sopra:  $\vec{F}$ .
3. Poche equazioni sono valide in tutte le situazioni. Nei casi significativi, le **limitazioni** delle equazioni importanti sono indicate tra parentesi quadre accanto all'equazione. Le equazioni che rappresentano le principali leggi della fisica sono evidenziate da un fondino colorato; questo vale anche per alcune altre equazioni indispensabili.




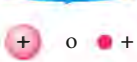

4. Alla fine di ogni capitolo viene presentata una serie di **Problemi** e **Quesiti e convinzioni errate**, cioè test a risposta multipla, che offrono alla valutazione soluzioni errate ma comuni insieme a soluzioni corrette. Più importanti sono i problemi, classificati per difficoltà nei livelli I, II o III. I problemi di livello I sono i più semplici, quelli di livello II sono di difficoltà standard, quelli di livello III ti metteranno particolarmente alla prova. I problemi sono raggruppati in paragrafi, ma i problemi di un dato paragrafo possono basarsi sul materiale precedente. Per ogni capitolo è presente un certo numero di **Problemi generali**, che non sono né organizzati per paragrafi, né classificati per difficoltà. I problemi relativi ai paragrafi facoltativi sono anch'essi contrassegnati da un asterisco (\*). Le **risposte** ai problemi di numero dispari sono disponibili nel sito dedicato al libro raggiungibile all'indirizzo [online.universita.zanichelli.it/giancolifisica2-3e](http://online.universita.zanichelli.it/giancolifisica2-3e).
5. Essere capaci di risolvere i problemi è parte integrante e cruciale dell'apprendimento della fisica, e fornisce un notevole aiuto alla comprensione dei concetti e dei principi. Questo libro contiene diversi suggerimenti e aiuti alla risoluzione dei problemi: (a) sono presenti **Esempi** completamente risolti, che dovrebbero essere studiati come parte integrante del testo; (b) alcuni degli Esempi risolti sono **Esempi di stima**, che mostrano come è possibile ottenere risultati approssimati anche in presenza di un numero limitato di informazioni; (c) in tutto il testo sono presenti **Guide alla risoluzione dei problemi** che suggeriscono come affrontare passo dopo passo la risoluzione dei problemi relativi a un determinato argomento – ricorda, però, che le strategie di fondo rimangono sempre le stesse. Molte di queste guide sono seguite da un esempio che viene risolto esplicitamente seguendo i passi suggeriti; (d) esistono paragrafi dedicati esplicitamente alla risoluzione dei problemi; (e) sono presenti anche delle note a margine per la risoluzione dei problemi che fanno riferimento ai suggerimenti presenti nel testo; (f) gli **Esercizi** presenti nel testo dovrebbero essere affrontati e risolti immediatamente, per poi confrontare la risposta con la soluzione data alla fine del capitolo; (g) alla fine di ogni capitolo si trovano numerosi problemi da svolgere (*vedi* punto 4).
6. Gli **Esempi concettuali** pongono domande che dovresti porti, su cui ragionare e dare una risposta. Datti del tempo per trovare la risposta prima di leggere la soluzione.
7. In **Appendice** troverai delle note di matematica e altre informazioni. Altri dati utili, fattori di conversione e formule matematiche si trovano nelle **Tavole** in fondo al libro.

# Note sull'uso dei colori

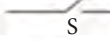




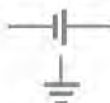
## Vettori

Un vettore generico	
Il vettore risultante è leggermente più spesso	
Le componenti di ogni vettore sono tratteggiate	
Spostamento ( $\vec{v}$ , $\vec{v}$ )	
Velocità ( $\vec{v}$ )	
Accelerazione ( $\vec{v}$ )	
Forza ( $\vec{v}$ )	
Forza su un secondo o un terzo oggetto nella stessa figura	 
Quantità di moto ( $\vec{p}$ o $v \vec{v}$ )	
Momento angolare ( $\vec{v}$ )	
Velocità angolare ( $\vec{\omega}$ )	
Momento torcente ( $\vec{\tau}$ )	
Campo elettrico ( $\vec{v}$ )	
Campo magnetico ( $\vec{v}$ )	


## Elettricità e magnetismo

Linee di campo elettrico	
Linee equipotenziali	
Linee di campo magnetico	
Carica elettrica (+)	
Carica elettrica (-)	


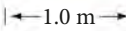
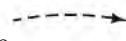

## Simboli di un circuito elettrico

Filo, con interruttore S	
Resistore (o resistenza)	
Condensatore	
Induttore (o induttanza)	
Batteria	
Messa a terra	

## Ottica

Raggio di luce	
Oggetto	
Immagine reale (tratteggiata)	
Immagine virtuale (tratteggiata e più chiara)	

## Altro

Livello energetico (di un atomo ecc.)	
Linee di misura	
Tragitto di un oggetto in movimento	
Direzione del moto o corrente	





## Induzione elettromagnetica e legge di Faraday

La legge dell'induzione elettromagnetica di Faraday è certamente una delle più importanti leggi fisiche. Essa afferma che la variazione del flusso del campo magnetico genera una forza elettromotrice indotta. La foto mostra una barretta magnetica in moto all'interno di una bobina, e un galvanometro che rileva il passaggio della corrente indotta. Il fenomeno dell'induzione elettromagnetica è alla base di numerosi dispositivi, dai generatori agli alternatori, dai trasformatori ai registratori magnetici su nastri o dischi, alle memorie dei calcolatori.

# 29

### DOMANDA DI APERTURA DEL CAPITOLO – Prova a rispondere!

Nella foto di apertura, una barretta magnetica viene inserita in una bobina, dove viene lasciata per un minuto, per poi esserne estratta. Che cosa vedrebbe un osservatore concentrato sull'ago del galvanometro?

- (a) Nessuna variazione (l'ago non si muove): in mancanza di una batteria non vi è alcuna corrente da misurare.
- (b) Lo scorrere di una debole corrente mentre la barretta magnetica si trova dentro la bobina.
- (c) Una brusca variazione di corrente non appena la barretta penetra nella bobina, e poi più nulla.
- (d) Una brusca variazione di corrente non appena la barretta penetra nella bobina, e poi la presenza di una debole corrente continua.
- (e) Una brusca variazione di corrente non appena la barretta penetra nella bobina, poi più nulla; successivamente un'altra brusca variazione di corrente in verso opposto quando il magnete viene estratto dalla bobina.

**N**el Capitolo 27 abbiamo studiato le relazioni tra i fenomeni magnetici e quelli elettrici; in particolare abbiamo visto che (1) le correnti elettriche producono campi magnetici e (2) un campo magnetico esercita una forza sui conduttori percorsi da corrente e sulle cariche elettriche in moto. Queste scoperte risalgono all'inizio degli anni '20 dell'800; nel periodo immediatamente successivo, gli scienziati cominciarono a chiedersi se, così come le correnti elettriche producono un campo magnetico, un campo magnetico sia in grado di produrre delle correnti elettriche. Dieci anni più tardi lo statunitense Joseph Henry (1797-1878) e l'inglese Michael Faraday (1791-1867) scoprirono, in maniera del

### ARGOMENTI

- 29.1 Forza elettromotrice indotta
- 29.2 Legge di Faraday dell'induzione elettromagnetica e legge di Lenz
- 29.3 Forza elettromotrice indotta in un conduttore in moto
- 29.4 Generatori elettrici
- 29.5 Forza contro elettromotrice e contromomento torcente; correnti di Foucault
- 29.6 Trasformatori e linee di trasmissione
- 29.7 Un flusso di campo magnetico variabile produce un campo elettrico
- \*29.8 Archiviazione delle informazioni: memorie magnetiche e memorie a semiconduttore
- \*29.9 Applicazioni dell'induzione elettromagnetica: microfoni, sismografi, interruttori salvavita

tutto indipendente, che questo fenomeno è possibile; Henry fu in realtà il primo a compiere tale scoperta, Faraday il primo a pubblicare i propri risultati e a condurre studi più approfonditi. I paragrafi seguenti sono dedicati a questo fenomeno e ad alcune sue applicazioni, inclusi i generatori di corrente, che hanno contribuito a modificare il nostro mondo.

## 29.1 Forza elettromotrice indotta

Michael Faraday, nei suoi esperimenti per produrre una corrente indotta da un campo magnetico, utilizzò un apparato simile a quello illustrato nella **Figura 29.1**. L'avvolgimento X è connesso alla batteria e la corrente che scorre in X produce un campo magnetico che viene amplificato dalla presenza del nucleo di ferro attorno a cui è avvolto il filo. Faraday sperava che un'intensa corrente continua in X avrebbe dato luogo a un campo magnetico così intenso da generare una corrente nel secondo avvolgimento Y disposto attorno allo stesso nucleo di ferro. Il secondo circuito, Y, è collegato a un galvanometro, senza essere collegato a una batteria; tutti i tentativi condotti con correnti costanti non produssero alcun risultato. Il fenomeno cercato fu infine scoperto quando Faraday si rese conto che l'ago del galvanometro subiva uno spostamento brusco quando il circuito collegato a X veniva chiuso e che l'ago subiva un altro spostamento improvviso, ma nel verso opposto, quando il circuito X veniva aperto. Una corrente costante in X produceva un campo magnetico che *non* generava alcuna corrente nel circuito Y; solo quando la corrente in X veniva instaurata o interrotta si generava una corrente in Y.

Le conclusioni di Faraday furono che mentre un campo magnetico costante non produce corrente in un conduttore, un campo magnetico *variabile* può originare una corrente, che viene detta **corrente indotta**. In definitiva:

**una variazione del campo magnetico induce una forza elettromotrice.**

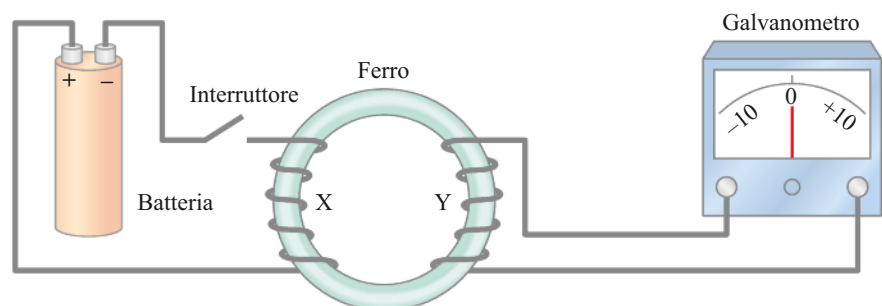
Faraday condusse ulteriori esperimenti sul fenomeno dell'**induzione elettromagnetica**. La **Figura 29.2** mostra, per esempio, come sia possibile produrre una corrente in una spira introducendovi rapidamente una barretta magnetica. Se il magnete viene improvvisamente rimosso, di nuovo viene indotta una corrente, ma questa volta nel verso opposto (in questo caso il campo magnetico  $\vec{B}$  attraverso la spira diminuisce). Inoltre, è possibile osservare la forza elettromotrice e la relativa corrente indotta anche se il magnete viene tenuto fermo e la spira viene allontanata o avvicinata. Per indurre una forza elettromotrice è necessaria una variazione del campo magnetico o la presenza di un moto. Non importa chi sia a muoversi, il magnete o la spira: quello che conta è il *moto relativo*.

**ESERCIZIO A** Tornate alla domanda di apertura del capitolo e provate a rispondere di nuovo. Date una spiegazione del perché la prima volta potreste aver risposto in maniera diversa.

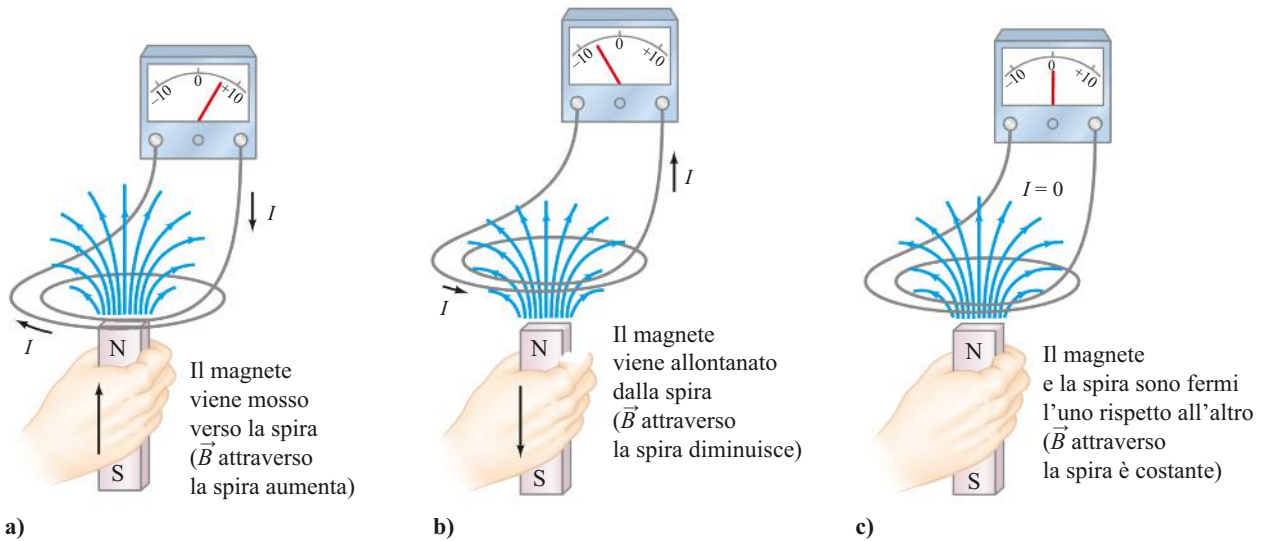
**ATTENZIONE**  
Non è il campo magnetico  $\vec{B}$ , bensì la sua variazione a indurre la corrente

**ATTENZIONE**  
Moto relativo: sia il magnete che la spira, muovendosi, inducono una corrente

**Figura 29.1** L'esperimento di Faraday: induzione di una forza elettromotrice. Notare che lo zero del galvanometro è al centro della scala e l'ago devia a sinistra o a destra, a seconda della direzione della corrente.







**Figura 29.2** a) Una corrente elettrica viene indotta se si muove un magnete in direzione di una spira, aumentando così momentaneamente il campo magnetico attraverso la spira. b) La corrente indotta ha verso opposto quando il magnete viene allontanato dalla spira (il campo magnetico diminuisce). In c) non si induce alcuna corrente se il magnete rimane fermo rispetto alla spira. È il movimento relativo che conta: si può produrre una forza elettromotrice anche se il magnete sta fermo e la spira si muove rispetto a esso.

## 29.2 Legge di Faraday dell'induzione elettromagnetica e legge di Lenz

Faraday condusse esperimenti accurati per capire da che cosa dipendesse l'intensità della forza elettromotrice indotta e scoprì che essa è tanto più grande quanto più rapida è la variazione dell'intensità del campo magnetico. Dimostrò anche che la f.e.m. indotta dipende dall'area della spira (e anche dall'angolo che la direzione del campo magnetico  $\vec{B}$  forma con il piano su cui la spira giace). In conclusione, la f.e.m. indotta è direttamente proporzionale alla velocità di variazione del **flusso del campo magnetico**,  $\Phi_B$ , attraverso il circuito (la spira) di area  $A$ . Nel caso di campo magnetico uniforme, il flusso attraverso la superficie  $A$  è definito, analogamente a quanto visto per il flusso del campo elettrico nel Capitolo 22, da:

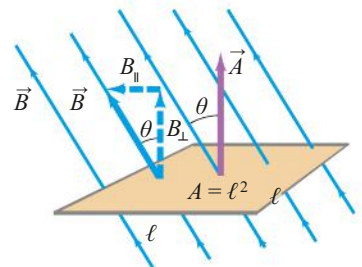
$$\Phi_B \square B_{\perp} A \square BA \cos \theta \square \vec{B} \cdot \vec{A}. \quad [\text{campo magnetico uniforme}] \quad (29.1a)$$

Nell'equazione,  $B_{\perp}$  rappresenta la componente del campo magnetico  $\vec{B}$  perpendicolare al piano della spira,  $\theta$  è l'angolo formato dal campo magnetico  $\vec{B}$  con il vettore  $\vec{A}$ , che ha per modulo l'area della superficie della spira ed è ortogonale al piano della spira. Tutte queste grandezze sono rappresentate nella **Figura 29.3** nel caso di una spira quadrata di lato  $\ell$  e di area  $A = \ell^2$ . Per un'area qualsiasi, o nel caso in cui il campo magnetico non sia uniforme, il flusso del campo magnetico si può scrivere:

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (29.1b)$$

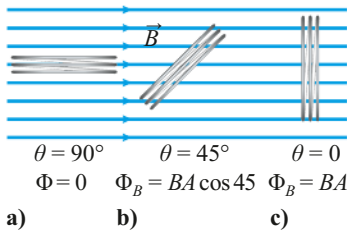
dove l'integrale è esteso all'area  $A$ <sup>1</sup>.

Alla stessa stregua delle linee di forza del campo elettrico  $\vec{E}$  definite nel Capitolo 27, le linee di forza del campo magnetico  $\vec{B}$  si possono disegnare in modo che il loro numero per unità di superficie (la loro densità) sia proporzionale all'intensità del campo stesso. Allora il flusso  $\Phi_B$  può essere pensato come una grandezza diret-



**Figura 29.3** Determinazione del flusso del campo magnetico attraverso un circuito formato da un filo chiuso su se stesso. Questo circuito è un quadrato di lato  $\ell$  e area  $A = \ell^2$ .

<sup>1</sup> L'integrale è esteso a una superficie aperta, cioè a una superficie delimitata da una curva chiusa, per esempio una circonferenza o un quadrato. Nel nostro caso, l'area considerata è quella delimitata dalla spira considerata. Notate la differenza con la legge di Gauss del Capitolo 22, dove invece la superficie considerata era una superficie chiusa.



**Figura 29.4** Il flusso del campo magnetico  $\Phi_B$  è proporzionale al numero di linee di forza di  $\vec{B}$  che passano attraverso le spire (in questo caso tre spire).

tamente proporzionale al numero di linee di forza che attraversano l'area racchiusa dal circuito. Questo è illustrato nella **Figura 29.4**, dove il circuito di tre spire è visto in prospettiva laterale. Per  $\theta = 90^\circ$  le linee di forza del campo non attraversano l'area delle spire e quindi il flusso in questo caso vale 0, mentre esso è massimo quando  $\theta = 0^\circ$ . L'unità di misura del flusso del campo magnetico nel sistema SI è tesla  $\cdot$  m<sup>2</sup>, chiamata anche **weber**: 1 Wb = 1 T  $\cdot$  m<sup>2</sup>.

**ESEMPIO CONCETTUALE 29.1**

**Come determinare il flusso**

Considerate la spira quadrata mostrata nella **Figura 29.5**, dove  $A_1$  rappresenta la sua area. Un campo magnetico uniforme  $\vec{B}$  ortogonale al piano della spira investe l'area  $A_2$ . Quanto vale il flusso del campo magnetico attraverso la spira  $A_1$ ?

**■ RISPOSTA** Potete considerare il campo magnetico pari a zero all'esterno dell'area  $A_2$ . Il flusso totale del campo magnetico attraverso l'area  $A_1$  è uguale al flusso attraverso la sola area  $A_2$ , che per l'Equazione 29.1a, dato che il campo è uniforme, vale  $BA_2$ , più il flusso attraverso l'area restante ( $= A_1 - A_2$ ), che è nullo dato che nullo è il campo magnetico. Di conseguenza il flusso totale vale  $\Phi_B = BA_2 + 0(A_1 - A_2) = BA_2$ . Il flusso non risulta uguale a  $BA_1$  perché il campo magnetico  $\vec{B}$  non è uniforme su tutta la superficie  $A_1$ .

Le Equazioni 29.1 rappresentano la nostra definizione di flusso e ci permettono di esprimere in modo quantitativo il risultato degli esperimenti di Faraday: la forza elettromotrice indotta in un circuito è uguale alla rapidità di variazione del flusso del campo magnetico attraverso il circuito; matematicamente:

$$\mathcal{E} \square - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad [\text{una sola spira}] \quad (29.2a)$$

► Legge di Faraday dell'induzione

Questo risultato rappresenta una delle leggi fondamentali dell'elettromagnetismo, nota come **legge di Faraday dell'induzione elettromagnetica**.

Se il circuito considerato è costituito da  $N$  spire fittamente avvolte, lo stesso flusso passa attraverso ciascuna spira, e quindi la forza elettromotrice totale è data dalla somma delle singole forze elettromotrici:

$$\mathcal{E} \square - N \frac{d\Phi_B}{dt} \quad [N \text{ spire}] \quad (29.2b)$$

► Legge di Faraday dell'induzione

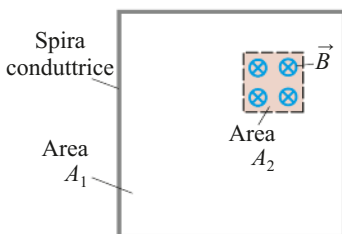
**ESEMPIO 29.2**

**Spira immersa in un campo magnetico**

Una spira quadrata di lato  $\ell = 5.0$  cm, è immersa in un campo magnetico uniforme  $B = 0.16$  T. Quanto vale il flusso del campo magnetico nella spira se (a) il campo magnetico  $\vec{B}$  è ortogonale al piano della spira, (b) il campo magnetico  $\vec{B}$  forma un angolo di  $30^\circ$  con il vettore  $\vec{A}$  perpendicolare al piano della spira? Determinate l'intensità della corrente media che circola nella spira se questa ha una resistenza di  $0.012 \Omega$  e viene ruotata dalla posizione (b) alla posizione (a) in  $0.14$  s.

**■ APPROCCIO** Usiamo la definizione  $\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{A}$  per calcolare il flusso del campo magnetico. Successivamente utilizziamo la legge di Faraday dell'induzione per calcolare la forza elettromotrice indotta nella spira; da questa ricaviamo la corrente indotta attraverso la formula  $I = \mathcal{E}/R$ .

**■ SOLUZIONE** L'area della spira vale  $A = \ell^2 = (5.0 \times 10^{-2} \text{ m})^2 = 2.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ; la direzione di  $\vec{A}$  è ortogonale al piano della spira (Figura 29.3).



**Figura 29.5** Esempio 29.1.

GUIDA ALLA RISOLUZIONE DEI PROBLEMI **Legge di Lenz**

La legge di Lenz permette di determinare il verso (convenzionale) in cui scorre la corrente indotta in una spira, per effetto di una variazione del flusso di un campo magnetico attraverso la spira stessa. Per produrre una corrente indotta sono necessarie:

- (a) una spira conduttrice;
- (b) un campo magnetico esterno il cui flusso attraverso la spira sia variabile.

1. Determinare se il flusso magnetico attraverso la spira ( $\Phi_B = BA \cos \theta$ ) è crescente, decrescente, o costante.
2. Il campo magnetico generato dalla corrente *indotta*: (a) punta nello stesso verso del campo esterno se il flusso è decrescente; (b) punta nel verso opposto a

quello del campo esterno se il flusso è crescente; (c) è nullo se il flusso è costante.

3. Una volta noto il verso del campo magnetico generato dalla corrente indotta, usate la regola della mano destra per stabilire il verso della corrente indotta.
4. Tenete sempre a mente che i campi magnetici in gioco sono due: (1) il campo magnetico esterno, il cui flusso variabile induce la forza elettromotrice nel circuito, e (2) il campo magnetico originato dalla corrente indotta nel circuito.
5. Se nella spira è già presente una corrente elettrica, la corrente totale mentre il campo magnetico è variabile è la somma algebrica della corrente originale e della corrente indotta.

**ESEMPIO CONCETTUALE 29.4****Applicazione della legge di Lenz**

In quale verso scorre la corrente indotta nelle spire circolari illustrate nella **Figura 29.9**?

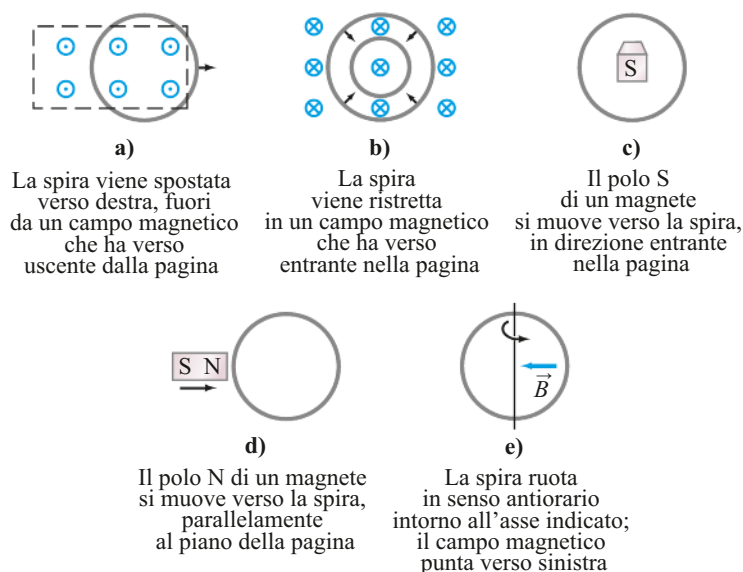
■ **RISPOSTA** (a) All'istante iniziale il campo magnetico uscente dalla pagina attraversa l'intera spira. Estrahendo la spira dal campo magnetico, il flusso che l'attraversa viene ridotto (fino a zero); di conseguenza la corrente indotta tenderà a sostenere il flusso producendo un campo magnetico uscente (in direzione di chi legge). Il verso della corrente indotta sarà antiorario.

(b) Il campo magnetico esterno è diretto verso l'interno della pagina e l'area della spira decresce. Il flusso è decrescente e quindi la corrente indotta scorre in senso orario onde produrre un campo magnetico entrante per contrastare la diminuzione del flusso.

(c) Le linee di forza del campo magnetico dovuto al magnete sono tali che, all'avvicinarsi del magnete alla spira, il campo entra nella pagina e il suo flusso aumenta. La corrente indotta scorrerà in verso antiorario in modo da originare un campo magnetico  $\vec{B}$  uscente dalla pagina, che si oppone all'aumento del flusso.

**ATTENZIONE**

*Il campo magnetico creato dalla corrente indotta si oppone alla variazione del flusso esterno e non necessariamente al campo esterno*



**Figura 29.9** Esempio 29.4.

(d) Il campo magnetico giace sul piano della spira, quindi non ci sono linee di forza che l'attraversano e il flusso è nullo durante tutto il processo. Il flusso è quindi costante nel tempo e nella spira non c'è induzione di forza elettromotrice o di corrente.

(e) All'istante iniziale non c'è flusso attraverso la spira, il campo magnetico  $\vec{B}$  giace sul piano della spira. Quando la spira comincia a ruotare, il flusso del campo magnetico esterno inizia ad aumentare. Per contrastare questa variazione di flusso, la corrente indotta avrà verso antiorario, e quindi il campo magnetico da lei generato punterà verso destra.

**ESERCIZIO B** Determinate il verso in cui scorre la corrente indotta nella spira ad opera della corrente che scorre nei fili per i casi illustrati nella **Figura 29.10**.

**ESEMPIO 29.5**

**Estrazione di una bobina da un campo magnetico**

Una bobina di filo conduttore quadrata di lato  $\ell = 5.00$  cm, costituita da 100 spire e di resistenza totale  $100 \Omega$ , è esposta ortogonalmente a un campo magnetico uniforme di intensità  $0.600$  T, come illustrato nella Figura 29.10. La bobina viene improvvisamente rimossa dal campo magnetico a velocità costante mantenendo la posizione ortogonale iniziale, fino a risultare del tutto esterna al campo. All'istante  $t = 0$  il lato destro della bobina si trova al bordo del campo; l'estrazione dura in tutto  $0.100$  s. Determinate (a) la velocità di variazione del flusso attraverso la bobina, (b) la forza elettromotrice indotta e la corrente indotta. (c) Inoltre, calcolate l'energia dissipata nella bobina e (d) la forza media ( $F_{est}$ ) richiesta nell'operazione.

**■ APPROCCIO** Per prima cosa determiniamo come varia il flusso magnetico  $\Phi_B = BA \cos 0^\circ = BA$  nell'intervallo di tempo  $\Delta t = 0.100$  s. La forza elettromotrice si può calcolare attraverso la legge di Faraday e la corrente per mezzo della legge di Ohm.

**■ SOLUZIONE** (a) L'area della bobina ha una misura di  $A = \ell^2 = (5.00 \times 10^{-2} \text{ m})^2 = 2.50 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ . Il flusso iniziale vale quindi  $\Phi_B = BA = (0.600 \text{ T})(2.50 \times 10^{-3} \text{ m}^2) = 1.50 \times 10^{-3} \text{ T} \cdot \text{m}^2$ ; dopo  $0.100$  s il flusso vale zero. La velocità di variazione del flusso è costante, dato che la bobina è quadrata, e per una spira vale:

$$\frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t} = \frac{0 - (1.50 \times 10^{-3} \text{ T} \cdot \text{m}^2)}{0.100 \text{ s}} = -1.50 \times 10^{-2} \text{ T} \cdot \text{m}^2/\text{s}.$$

(b) La forza elettromotrice indotta nella bobina di  $N = 100$  spire durante l'intervallo di tempo di  $0.100$  s vale (Eq. 29.2):

$$\mathcal{E} = -N \frac{\Delta \Phi_B}{\Delta t} = -(100)(-1.50 \times 10^{-2} \text{ T} \cdot \text{m}^2/\text{s}) = 1.50 \text{ V}.$$

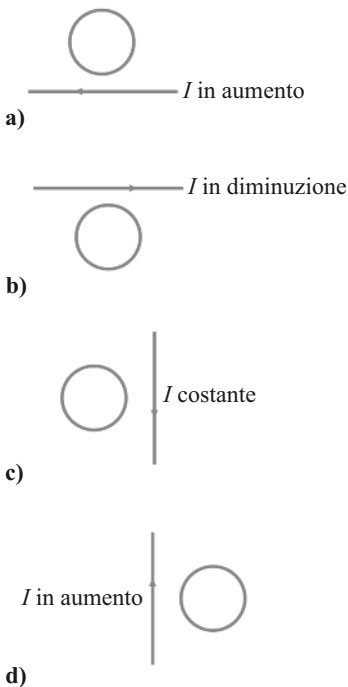
La corrente indotta è data dalla legge di Ohm applicata alla bobina di resistenza  $100 \Omega$ :

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{1.50 \text{ V}}{100 \Omega} = 1.50 \times 10^{-2} \text{ A} = 15.0 \text{ mA}.$$

Per la legge di Lenz, il verso della corrente indotta è orario, in modo che il campo magnetico prodotto sia entrante e quindi si opponga alla diminuzione del flusso.

(c) L'energia totale dissipata nella bobina è data dal prodotto della potenza dissipata ( $= I^2 R$ ) per l'intervallo di tempo:

$$E = Pt = I^2 Rt = (1.50 \times 10^{-2} \text{ A})^2 (100 \Omega) (0.100 \text{ s}) = 2.25 \times 10^{-3} \text{ J}.$$



**Figura 29.10** Esercizio B.

(d) Possiamo utilizzare il risultato del punto (c) e applicare il teorema dell'energia cinetica: l'energia dissipata  $E$  è uguale al lavoro  $W$  compiuto per estrarre la bobina dal campo magnetico (Capitoli 7 e 8 del Volume 1). Dato che  $W = \vec{F}_{\text{est}} d$ , dove  $d = 5.00$  cm, si ha:

$$\vec{F}_{\text{est}} = \frac{W}{d} = \frac{2.25 \times 10^{-3} \text{ J}}{5.00 \times 10^{-2} \text{ m}} = 0.0450 \text{ N}.$$

■ **SOLUZIONE ALTERNATIVA** (d) Possiamo calcolare la forza facendo direttamente uso dell'Equazione 27.3,  $\vec{F} = I \vec{\ell} \times \vec{B}$ , che in questo caso, e per un campo magnetico uniforme, diviene  $F = I \ell B$ . Le forze esercitate dal campo magnetico sui lati superiore e inferiore della bobina quadrata sono uguali e opposte e quindi si cancellano. La forza magnetica esercitata sul lato verticale di sinistra è diretta verso sinistra, dato che la corrente indotta scorre verso l'alto (senso orario). Il lato destro della bobina si trova invece nella regione in cui il campo magnetico è nullo e quindi non subisce alcuna forza. Di conseguenza la forza esterna applicata al lato destro deve bilanciare la forza magnetica agente sul lato sinistro; dato che  $N = 100$ , abbiamo:

$$F_{\text{est}} = NI \ell B = (100)(0.0150 \text{ A})(0.0500 \text{ m})(0.600 \text{ T}) = 0.0450 \text{ N}$$

come calcolato precedentemente; abbiamo così confermato la corretta applicazione del teorema dell'energia cinetica.

### ESEMPIO 29.6

#### Corrente continua iniziale nella bobina

Supponiamo che le 100 spire della **Figura 29.11**, Esempio 29.5, siano collegate a una f.e.m. che produce una corrente continua di 60.0 mA in senso antiorario. Quando la bobina quadrata viene estratta dal campo magnetico, qual è la corrente che scorre nelle spire?

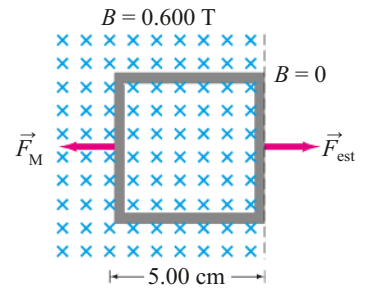
■ **SOLUZIONE** Quando la bobina quadrata viene tirata a destra, al di fuori del campo magnetico, viene indotta nelle spire una corrente di 15.0 mA in senso orario, come abbiamo visto nell'Esempio 29.5. La corrente totale varrà  $(60.0 - 15.0) \text{ mA} = 45.0 \text{ mA}$ . Una volta che l'intera bobina è fuori dal campo magnetico, la corrente tornerà a valere 60.0 mA.

## 29.3 Forza elettromotrice indotta in un conduttore in moto

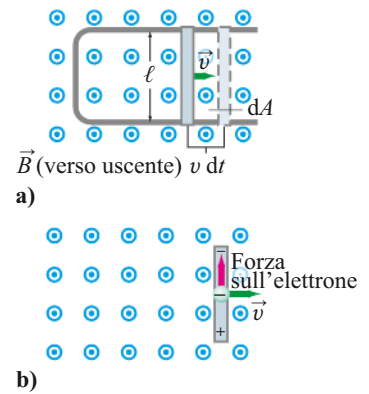
Un modo diverso per generare una forza elettromotrice indotta è illustrato nella **Figura 29.12a**; questo caso è particolarmente importante per comprendere appieno il significato del fenomeno dell'induzione elettromagnetica. Consideriamo un campo magnetico,  $\vec{B}$ , uniforme e ortogonale alla superficie delimitata dal conduttore a forma di U e dalla barretta metallica poggiata su di esso. Se la barretta si muove con velocità  $v$ , lo spazio percorso nell'intervallo di tempo  $dt$  sarà pari a  $dx = v dt$ . Di conseguenza, nello stesso intervallo di tempo, l'area del circuito aumenterà della quantità  $dA = \ell dx = \ell v dt$ . Per la legge di Faraday verrà indotta nel circuito una forza elettromotrice di intensità:

$$\mathcal{E} = \frac{d\Phi_B}{dt} = \frac{B dA}{dt} = \frac{B \ell v dt}{dt} = B \ell v. \quad (29.3)$$

La corrente indotta scorrerà in senso orario (per contrastare l'aumento del flusso).



**Figura 29.11** Esempio 29.5. Un avvolgimento quadrato immerso in un campo magnetico  $B = 0.600$  T viene spostato improvvisamente verso destra, in una regione dove  $B = 0$ . (Le forze illustrate nella figura vengono discusse nella soluzione alternativa presentata al termine dell'Esempio 29.5.)



**Figura 29.12** a) Una barretta conduttrice viene fatta scorrere verso destra su un conduttore a forma di U immerso in un campo magnetico uniforme  $\vec{B}$  che ha verso uscente dalla pagina. b) Forza agente (verso l'alto) su un elettrone della barretta metallica (in moto verso destra) dovuta al campo  $\vec{B}$  uscente dalla pagina. Di conseguenza gli elettroni possono essere raggruppati in cima alla barretta, lasciando in fondo alla barretta una carica positiva.





Figura 29.13 Esempio 29.7.

L'Equazione 29.3 è valida solo se il campo  $B$ , il lato  $\ell$  e la velocità  $v$  sono mutuamente ortogonali (in caso contrario, occorre considerare solo le componenti di questi vettori fra loro perpendicolari). La forza elettromotrice indotta in un conduttore in moto è detta anche *f.e.m. mozionale*.

È possibile dedurre l'Equazione 29.3 anche senza utilizzare la legge di Faraday. Nel Capitolo 27 abbiamo visto che su una particella carica  $q$  in moto con velocità  $v$  ortogonale a un campo magnetico  $B$  agisce una forza  $\vec{F} \propto q\vec{v} \times \vec{B}$  (Eq. 27.5a). Quando la barretta della Figura 29.12a si muove verso destra a velocità  $v$ , gli elettroni al suo interno si muovono nella stessa direzione e alla stessa velocità; per cui, dato che  $\vec{v} \perp \vec{B}$  su ogni elettrone agisce una forza  $F = qvB$ , posta nel piano della pagina e diretta verso l'alto (Figura 29.12b). Se la barretta non fosse a contatto con il conduttore a U, gli elettroni si accumulerebbero all'estremità superiore della barretta e lascerebbero l'estremità inferiore con un eccesso di carica positiva (notate i segni nella Figura 29.12b). Ai capi della barretta apparirebbe una forza elettromotrice indotta. Al contrario, poiché qui la barretta è a contatto con il conduttore a U, gli elettroni scorrono nel circuito e quindi vi è una corrente con verso (convenzionale) orario.

Per calcolare la forza elettromotrice possiamo determinare il lavoro  $W$  necessario per spostare una carica  $q$  da un'estremità della barretta all'altra vincendo la differenza di potenziale:  $W = \text{forza} \times \text{distanza} = (qvB)(\ell)$ . La forza elettromotrice è uguale al lavoro per unità di carica, per cui  $\mathcal{E} = W/q = qvB\ell/q = B\ell v$ , lo stesso risultato<sup>2</sup> a cui si era giunti applicando la legge di Faraday (Eq. 29.3).

**ESERCIZIO C** Con riferimento alla Figura 29.12, in quale verso scorrerebbero gli elettroni se la barretta fosse in movimento verso sinistra dando luogo a una diminuzione dell'area del circuito?

#### ESEMPIO 29.7 ■ Stima

##### Intensità della forza elettromotrice indotta su un aeroplano in moto

Un aeroplano viaggia a 1000 km/h in una regione in cui il campo magnetico terrestre vale  $5.0 \times 10^{-5}$  T ed è con buona approssimazione verticale (Figura 29.13). Quanto vale la differenza di potenziale indotta tra le due estremità delle ali, la cui distanza è di 70 m?

■ **APPROCCIO** Consideriamo le ali come due conduttori in moto nel campo magnetico terrestre e usiamo l'Equazione 29.3 per calcolare la forza elettromotrice.

■ **SOLUZIONE** Dato che  $v = 1000$  km/h = 280 m/s, e che  $v$  è ortogonale a  $\vec{B}$  abbiamo:

$$\mathcal{E} = B\ell v = (5.0 \times 10^{-5} \text{ T})(70 \text{ m})(280 \text{ m/s}) \approx 1 \text{ V}.$$

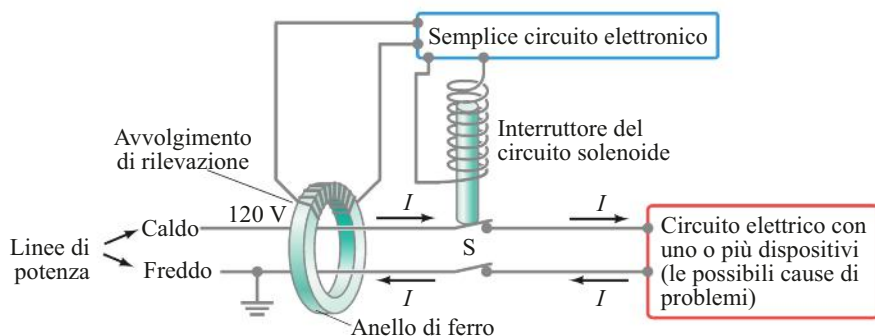
■ **NOTA** Non è un valore tale da destare preoccupazione!

#### ESEMPIO 29.8

##### Misura elettromagnetica del flusso sanguigno

Dato che il sangue umano contiene ioni carichi, possiamo misurare la sua velocità di scorrimento nei vasi sanguigni mediante l'apparato illustrato nella Figura 29.14. Supponiamo che i vasi abbiano un diametro di 2.0 mm, che il campo magnetico utilizzato valga 0.080 T, e che la forza elettromotrice misurata sia 0.10 mV. Quanto vale la velocità  $v$  del flusso sanguigno?

<sup>2</sup> L'argomento qui utilizzato, basato sulla forza e analogo a quello sfruttato nel caso dell'effetto Hall (par. 27.8), è in grado di spiegare questo modo specifico di indurre una forza elettromotrice; non spiega invece il fenomeno più generale dell'induzione elettromagnetica.



**Figura 29.35** Un interruttore salvavita.

### ■ \*Interruttore salvavita

I fusibili e gli interruttori (parr. 25.6 e 28.9) proteggono gli edifici dagli incendi prodotti dall'elettricità e gli apparecchi domestici dai danni dovuti a elevate correnti indesiderate. Essi, però, non interrompono la corrente se non quando la sua intensità è di molto superiore a quella capace di causare danni permanenti alla salute delle persone, o addirittura la morte (circa 100 mA). Se sono abbastanza rapidi, possono proteggere nel caso di cortocircuito; un **interruttore salvavita** serve invece a proteggere le persone.

L'induzione elettromagnetica è alla base di ogni interruttore salvavita. Con riferimento alla **Figura 29.35**, i due fili conduttori di una linea elettrica collegati a un circuito o a un dispositivo (in rosso) passano attraverso un piccolo anello di ferro. Attorno all'anello sono avvolte numerose spire di un filo sottile che agisce come avvolgimento di rilevazione. In condizioni normali, in assenza di cortocircuito, la corrente che scorre nel filo caldo viene esattamente bilanciata dalla corrente di ritorno che fluisce nel filo normale. Se qualcosa funziona male e il filo caldo viene a contatto con la scatola metallica priva di messa a terra di un apparecchio, può succedere che una parte della corrente entrante attraversi il corpo di una persona a contatto con la scatola e di qui vada a terra (**guasto a terra**). In questo caso la corrente di ritorno nel filo neutro avrà intensità minore della corrente entrante nel filo caldo, e ci sarà una *corrente netta* attraverso l'anello di ferro dell'interruttore. Dato che la corrente è alternata, essa è variabile e la differenza di corrente produce un campo magnetico variabile nel ferro, che a sua volta induce una forza elettromotrice nell'avvolgimento di rilevazione posto attorno al ferro. Per esempio, se in un elettrodomestico passano 8.0 A e si verifica un passaggio di corrente di 100 mA (= 0.1 A) attraverso una persona, allora nel filo neutro fluirà una corrente di 7.9 A. La forza elettromotrice indotta da questa differenza di 0.10 mA nell'avvolgimento di rilevazione viene amplificata da un semplice transistor e inviata all'interruttore, che reagisce aprendo il circuito e proteggendo così la vita della persona.

Nel caso in cui l'apparecchio che non funziona correttamente sia messo a terra, la differenza di corrente sarà ancora più marcata e l'interruttore scatterà immediatamente.

Gli interruttori salvavita sono sensibili a correnti dell'ordine di 5 mA e reagiscono in 1 millisecondo. Solitamente sono di piccole dimensioni e possono essere inseriti nelle pareti (**Figura 29.36a**), o nelle spine di connessione degli elettrodomestici (**Figura 29.36b**). Risulta particolarmente importante avere degli interruttori salvavita in cucina, in bagno, vicino a una piscina e in luoghi dove il rischio risulta maggiore. Gli interruttori salvavita sono sempre dotati di un pulsante di "prova" (per essere sicuri del "funzionamento") e di un pulsante di "riavvio" (dopo che l'interruttore ha agito).

**Figura 29.36** a) Interruttore salvavita da parete (modello in uso negli USA). Questi interruttori sono facili da riconoscere perché hanno sempre un pulsante di "prova" e uno per la rimessa in funzione. b) Presa elettrica dotata di interruttore salvavita.

**FISICA APPLICATA**  
Interruttore salvavita



a)



b)



## ► Sommario

Il **flusso del campo magnetico** che passa attraverso una spira è uguale al prodotto dell'area della spira per la componente del campo magnetico ortogonale al piano su cui essa giace:  $\Phi_B = B_{\perp} A = BA \cos \theta$ . Se il campo magnetico non è uniforme, il flusso è dato dall'integrale:

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}. \quad (29.1b)$$

La variazione del flusso del campo magnetico attraverso un avvolgimento (bobina) induce una forza elettromotrice nell'avvolgimento stesso. L'intensità della forza elettromotrice indotta è uguale alla velocità di variazione del campo magnetico attraverso l'area dell'avvolgimento moltiplicato per il numero  $N$  delle spire nell'avvolgimento:

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_B}{dt}. \quad (29.2b)$$

Questo risultato è noto come **legge di Faraday dell'induzione**.

La forza elettromotrice indotta può generare una corrente che produce un diverso campo magnetico, che si oppone alla variazione di flusso del campo magnetico originario (**legge di Lenz**).

Dalla legge di Faraday si può anche ricavare la forza elettromotrice indotta fra i capi di un filo diritto di lunghezza  $\ell$  che si muove con velocità  $v$  in direzione ortogonale a un campo magnetico di intensità  $B$ :

$$\mathcal{E} = B\ell v. \quad (29.3)$$

Un **generatore** elettrico trasforma energia meccanica in energia elettrica e il suo principio di funzionamento si basa sulla legge di Faraday. Un avvolgimento conduttore è messo in rotazione attorno al suo asse di simmetria, per mezzo di qualche congegno meccanico, in presenza di un campo magnetico; la variazione del flusso del campo magnetico attraverso l'avvolgimento induce una corrente sinusoidale in uscita dal generatore.

Un motore, che opera in modo inverso al generatore, agisce come un generatore, nel senso che induce una **forza controlettromotrice** nell'avvolgimento rotante; dato che

la forza elettromotrice si oppone alla tensione di ingresso, essa può limitare la corrente nell'avvolgimento. In maniera simile, un generatore agisce praticamente come un motore, dato che un **contromomento torcente** viene a essere applicato all'avvolgimento rotante.

Il **trasformatore** modifica l'intensità di una tensione alternata. È costituito da due avvolgimenti, uno detto primario, l'altro secondario. La variazione di flusso del campo magnetico, associato a una tensione alternata applicata al circuito primario, induce una tensione alternata nel circuito secondario. Nei trasformatori ideali, con efficienza del 100%, il rapporto tra la tensione di uscita e quella di ingresso è uguale al rapporto tra il numero delle spire del circuito secondario e quello del circuito primario:

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p}. \quad (29.5)$$

Le correnti nel circuito secondario e nel primario variano in ragione inversa al numero delle spire:

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{N_p}{N_s}. \quad (29.6)$$

Dalla legge di Faraday segue che un *flusso di campo magnetico variabile produce un campo elettrico*. La formula che ne consegue risulta essere:

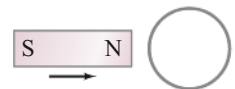
$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = -\frac{d\Phi_B}{dt} \quad (29.8)$$

che rappresenta la forma generale della legge di Faraday. L'integrale a primo membro dell'Equazione 29.8 si calcola sul circuito chiuso attraverso cui varia il flusso del campo magnetico.

[\*Testine di lettura/scrittura su nastri e dischi magnetici così come microfoni, interruttori salvavita e sismografi rappresentano applicazioni dell'induzione elettromagnetica. Le memorie dei computer e l'archiviazione dei dati funzionano usando memorie magnetiche o memorie a semiconduttore (RAM, flash).]

## ► Quesiti

1. Quale sarebbe il vantaggio di utilizzare bobine con un alto numero di spire nell'esperimento di Faraday (Figura 29.1)?
2. Qual è la differenza tra flusso del campo magnetico e campo magnetico?
3. Supponete di tenere in mano un anello circolare di filo conduttore e di introdurre all'improvviso un magnete dalla parte del polo sud. Verrà indotta una corrente nell'anello? Vi sarà corrente indotta se il magnete verrà tenuto fermo all'interno dell'anello? Vi sarà corrente indotta quando il magnete verrà estratto? In tutti i casi in cui la vostra risposta è affermativa, specificate il verso della corrente indotta.
4. Quale sarà il verso della corrente della Figura 29.12a se la barra si muove verso sinistra, diminuendo così l'area della spira sulla sinistra?
5. (a) Se il polo nord di un sottile magnete piatto si muove su una tavola verso una spira, anch'essa piatta sulla tavola (**Figura 29.37**), qual è il verso della corrente indotta nell'anello? Supponiamo che il magnete abbia lo stesso spessore del filo della spira. (b) Cosa succede se il magnete è quattro volte più spesso del filo della spira? Giustificate le vostre risposte.



**Figura 29.37** Quesito 5.

6. Due anelli conduttori si muovono nelle immediate vicinanze di un filo rettilineo molto lungo in cui scorre una corrente continua (Figura 29.38). Determinate il verso della corrente indotta in ciascuno dei due anelli.

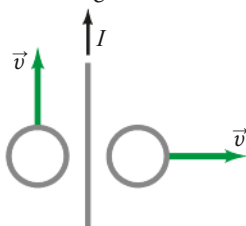


Figura 29.38 Quesiti 6 e 7.

7. Rispondete al Quesito 6 nel caso in cui la corrente  $I$  nella Figura 29.38 sia decrescente.
8. Supponete di osservare due anelli circolari, separati e posti uno dietro l'altro, e di guardare lungo la direzione individuata dai due centri. Una batteria viene improvvisamente collegata al primo anello originando una corrente in verso orario. (a) Vi sarà corrente indotta nel secondo anello? (b) Se la risposta è affermativa, quando inizierà a scorrere questa corrente? (c) Quando cesserà di fluire? (d) Quale sarà il suo verso? (e) Esiste una forza tra i due anelli? (f) Se sì, con quale verso agisce?
9. La batteria del Quesito 8 viene disconnessa. Vi sarà una corrente indotta nel secondo anello? Se la risposta è affermativa, quando inizia e quando termina questa corrente? Quale sarà il suo verso?
10. Determinate il verso della corrente indotta nel resistore  $R_A$  della Figura 29.39 quando (a) l'avvolgimento B viene avvicinato all'avvolgimento A, (b) l'avvolgimento B viene allontanato dall'avvolgimento A, (c) la resistenza  $R_A$  viene aumentata.

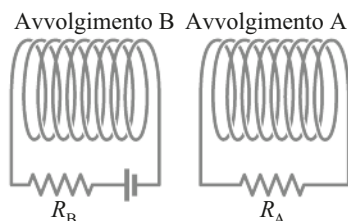


Figura 29.39 Quesito 10.

11. Per quale motivo è vantaggioso porre molto vicini tra loro, o addirittura attorcigliare l'uno all'altro, due cavi elettrici isolati che conducono corrente alternata?
12. Nelle situazioni in cui deboli segnali devono percorrere lunghe distanze è utile utilizzare *cavi schermati*. Qui il segnale viaggia lungo un cavo circondato da materiale isolante, avvolto a sua volta da un conduttore lungo cui viaggia il segnale di ritorno (Figura 28.12). Per quale motivo è necessario schermare il cavo?
13. Utilizzate la Figura 29.15 e la regola della mano destra per dimostrare perché il contromomento torcente in un generatore si oppone al movimento.
14. L'uso di linee a tensione maggiore, per esempio 600 V o 1200 V, negli impianti domestici permetterebbe di ridurre la dissipazione di energia. Per quale motivo non vengono usate?

15. Dall'involucro che racchiude un trasformatore escono quattro fili conduttori. (a) Come fareste a stabilire quali fili appartengono a uno degli avvolgimenti e quali all'altro? (b) Siete in grado di determinare il rapporto tra il numero di spire dei due avvolgimenti senza aprire l'involucro?
16. Un trasformatore progettato per operare alla tensione alternata di 120 V si "brucia" se viene connesso a una tensione continua di 120 V. Perché? [Suggerimento: di solito la resistenza del circuito primario è molto bassa.]
17. Spiegate perché l'illuminazione può temporaneamente indebolirsi quando si accende il motore di un frigorifero. Se invece si accende un forno elettrico l'illuminazione può rimanere fioca per tutto il tempo per il quale il forno è acceso. Spiegate la differenza.
18. Consideriamo un grande magnete i cui poli nord e sud sono vicini tra loro così da formare un campo magnetico uniforme, come mostrato nella Figura 27.7. Se un foglio di alluminio è tenuto tra i poli, è necessaria una certa forza per estrarlo dal campo magnetico anche se il foglio di alluminio non è ferromagnetico e non tocca le facce polari. Spiegate il perché.
19. Una barretta magnetizzata viene tenuta sopra il pavimento e lasciata cadere (Figura 29.40). Nel caso (a), il magnete cade attraverso una spira. Nel caso (b), non c'è nulla tra il magnete e il pavimento. Come si confrontano fra di loro le velocità del magnete nei due casi? Giustificate la vostra risposta.

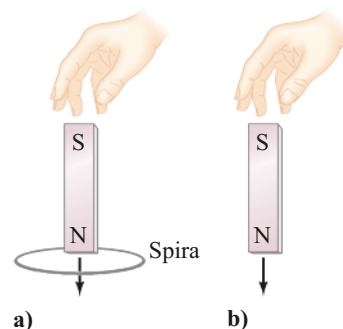


Figura 29.40 Quesito 19 e Quesito e convinzioni errate 5.

20. Le correnti di Foucault (Figura 29.21) sono in grado di frenare dischi rotanti di rame o di alluminio, o i dischi devono essere costituiti da materiale ferromagnetico?
21. È stato proposto di utilizzare le correnti di Foucault per separare i materiali solidi in discarica per il riciclaggio. Prima il materiale viene macinato e ridotto in pezzi sottili, successivamente il ferro viene rimosso usando un normale magnete. Il materiale di risulta viene poi fatto scivolare lungo un piano inclinato al di sopra di magneti permanenti. Come potrebbe essere utile questo procedimento per separare i materiali non ferrosi (Al, Cu, Pb, ottone) dai materiali non metallici?
22. Il fulcro metallico fissurato di Figura 29.41 cade molto più rapidamente di una barra piena attraverso un campo magnetico. Illustratene le ragioni.

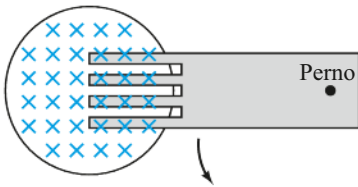


Figura 29.41 Quesito 22.

23. Una barretta metallica, incernierata a un estremo, oscilla liberamente in assenza di campo magnetico. In presenza di un campo magnetico, invece, le sue oscillazioni vengono rapidamente smorzate. Illustratene la

ragione. (Questo **smorzamento magnetico** viene utilizzato in numerosi dispositivi.)

- \*24. Una barretta magnetica in caduta libera in un tubo verticale con pareti metalliche raggiunge una velocità limite anche se nel tubo viene fatto il vuoto e quindi non c'è resistenza da parte dell'aria. Perché?
- \*25. Dato che un microfono è del tutto simile a un altoparlante, si potrebbe usare un altoparlante come microfono (par. 27.6)? In altre parole, potreste parlare dentro un altoparlante e ottenere un segnale di uscita che potrebbe essere amplificato? Spiegate il perché. Discutete, alla luce della vostra risposta, le differenze di progettazione e costruzione di un microfono e di un altoparlante.

### ► Quesiti e convinzioni errate

1. Una bobina è a riposo sul piano della pagina mentre un campo magnetico è diretto verso l'interno della pagina. Viene indotta una corrente in senso orario:
  - (a) quando il campo magnetico diventa più intenso;
  - (b) quando l'area della bobina diminuisce;
  - (c) quando la bobina viene spostata lateralmente lungo la pagina;
  - (d) quando il campo magnetico è inclinato in modo che non sia più perpendicolare alla pagina.
2. Una spira circolare si muove a velocità costante senza ruotare attraverso un campo magnetico costante. La corrente indotta nella spira sarà
  - (a) in senso orario;
  - (b) in senso antiorario;
  - (c) zero;
  - (d) occorre conoscere l'orientamento della spira rispetto a quello del campo magnetico.
3. Una spira quadrata si muove verso destra a partire da un'area dove  $\vec{B} \neq 0$ , attraversando completamente una regione contenente un campo magnetico uniforme diretto verso l'interno della pagina (Figura 29.42), per poi attraversare la linea L, una regione in cui di nuovo  $\vec{B} = 0$ . Nella spira verrà indotta una corrente
  - (a) solo quando passa la linea J;
  - (b) solo quando passa la linea K;
  - (c) solo quando passa la linea L;
  - (d) quando passa la linea J o la linea L;
  - (e) quando passa tutte e tre le linee.

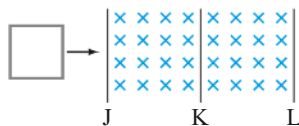


Figura 29.42 Quesito e convinzioni errate 3.

4. Due spire C e D si muovono in prossimità di un filo rettilineo molto lungo che trasporta una corrente continua (Figura 29.43). Determinate il verso della corrente indotta in ciascuna spira. Per C:
  - (a) in senso orario;

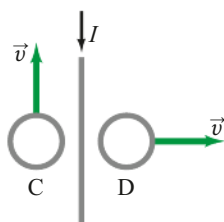


Figura 29.43 Quesito e convinzioni errate 4.

- (b) in senso antiorario;
  - (c) zero;
  - (d) alternato (corrente alternata).
- Per D:
- (a) in senso orario;
  - (b) in senso antiorario;
  - (c) zero;
  - (d) alternato (corrente alternata).

5. Se c'è una corrente indotta nel Quesito 19 (vedi Figura 29.40), non costerebbe dell'energia? Da dove proverebbe quell'energia nel caso (a)?
  - (a) La corrente indotta non necessita di energia.
  - (b) La conservazione dell'energia è violata.
  - (c) C'è meno energia cinetica.
  - (d) C'è più energia potenziale gravitazionale.
6. Una spira di plastica isolante è mantenuta in un campo magnetico che punta fuori dalla pagina (Figura 29.44). All'aumentare dell'intensità del campo
  - (a) verrà prodotta una forza elettromotrice indotta che provoca una corrente in senso orario;
  - (b) verrà prodotta una forza elettromotrice indotta che provoca una corrente in senso antiorario;
  - (c) verrà prodotta una forza elettromotrice indotta, ma nessuna corrente;
  - (d) non verrà prodotta una forza elettromotrice indotta.

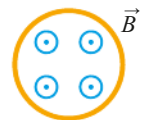


Figura 29.44 Quesito e convinzioni errate 6.

7. In un lungo filo rettilineo scorre una corrente I come mostrato nella Figura 29.45. Una piccola spira si trova nel piano della pagina. Quale delle seguenti azioni non indurrà una corrente nel circuito?
  - (a) Aumentare la corrente nel filo dritto.
  - (b) Spostare la spira in una direzione parallela al filo.
  - (c) Ruotare la spira in modo che diventi perpendicolare al piano della pagina.
  - (d) Allontanare la spira dal filo senza ruotarla.
  - (e) Allontanare la spira dal filo mentre la si ruota.

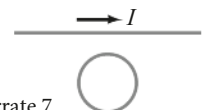


Figura 29.45 Quesito e convinzioni errate 7.

8. Quando un generatore viene utilizzato per produrre corrente elettrica, da quale fonte proviene l'energia elettrica risultante?  
 (a) Dal campo magnetico del generatore.  
 (b) Da qualunque cosa che ruoti l'asse del generatore.  
 (c) Dalla resistenza della bobina del generatore.  
 (d) Dalla forza controelettromotrice.  
 (e) Dallo spazio vuoto.
9. Quale delle seguenti azioni non aumenterà la tensione di uscita di un generatore?  
 (a) Ruotare il generatore più velocemente.  
 (b) Aumentare l'area della bobina.  
 (c) Ruotare il campo magnetico in modo che sia più vicino all'asse di rotazione del generatore.  
 (d) Aumentare il campo magnetico attraverso la bobina.  
 (e) Aumentare il numero di spire nella bobina.
10. Due bobine separate ma vicine sono montate lungo lo stesso asse. Un alimentatore controlla il flusso di corrente nella prima bobina, e quindi il campo magnetico che essa produce. La seconda bobina è collegata solo a un amperometro. L'amperometro indicherà che una corrente scorre nella seconda bobina  
 (a) ogni volta che una corrente scorre nella prima bobina;  
 (b) solo quando una corrente costante scorre nella prima bobina;  
 (c) solo quando la corrente nella prima bobina varia;  
 (d) solo se la seconda bobina è collegata all'alimentazione collegandola in serie alla prima bobina.
11. Quale delle seguenti operazioni può realizzare un buon trasformatore?  
 (a) Variare la tensione ma non la corrente.  
 (b) Variare la corrente ma non la tensione.  
 (c) Variare la potenza.  
 (d) Variare la corrente e la tensione.
12. La corrente elettrica alternata di una presa a muro è più comunemente prodotta da  
 (a) un collegamento a batterie ricaricabili;  
 (b) una bobina che ruota in un campo magnetico;  
 (c) accelerando gli elettroni tra piastre di condensatori con carica opposta;  
 (d) utilizzando un motore;  
 (e) riscaldando e raffreddando alternativamente un filo.
13. Quale delle seguenti affermazioni sui trasformatori è falsa?  
 (a) I trasformatori funzionano utilizzando corrente alternata o corrente continua.  
 (b) Se la corrente nel secondario è maggiore, la tensione è inferiore.  
 (c) Se la tensione nel secondario è maggiore, la corrente è inferiore.  
 (d) Se non si perde flusso, il prodotto della tensione e della corrente è lo stesso negli avvolgimenti primario e secondario.

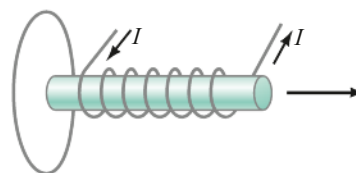
## ► Problemi

### 29.1 e 29.2 Legge di Faraday dell'induzione elettromagnetica

1. (I) Il flusso del campo magnetico attraverso una bobina costituita da due spire varia in modo uniforme da  $-68 \text{ Wb}$  a  $+48 \text{ Wb}$  in  $0.42 \text{ s}$ . Quanto vale la forza elettromotrice indotta nella bobina?
2. (I) La spira rettangolare illustrata nella **Figura 29.46** viene introdotta nella regione in cui è presente il campo magnetico entrante disegnato nella figura. In che verso fluirà la corrente indotta?
- Figura 29.46** Problema 2.
3. (I) Una spira circolare di diametro  $22.0 \text{ cm}$  giace inizialmente su un piano ortogonale a un campo magnetico di intensità  $1.5 \text{ T}$ . La spira viene posta in rotazione e in  $0.35 \text{ s}$  assume una posizione parallela alle linee di forza del campo. Quanto vale la forza elettromotrice media indotta nella spira?
4. (II) Un avvolgimento di diametro  $22.0 \text{ cm}$  è costituito da  $36$  spire circolari di rame di diametro  $2.6 \text{ mm}$ . Un campo magnetico uniforme ortogonale al piano dell'avvolgimento ha un'intensità che varia al tasso di  $8.65 \times 10^{-3} \text{ T/s}$ . Calcolate (a) la corrente nell'avvolgimento e (b) il tasso a cui viene prodotta l'energia termica.



5. (II) Una spira circolare di diametro  $16 \text{ cm}$  è esposta a un campo magnetico di intensità  $0.65 \text{ T}$ . (a) Calcolate il flusso del campo magnetico attraverso la spira quando il piano della spira è ortogonale alle linee di forza del campo. (b) Se il piano della spira viene ruotato fino a formare un angolo di  $35^\circ$  con le linee di forza del campo, quale valore si deve usare per l'angolo  $\theta$  nell'Equazione 29.1? (c) In quest'ultima configurazione quanto vale il flusso del campo magnetico attraverso la spira?
6. (II) Una bobina fissa di  $10.8 \text{ cm}$  di diametro è perpendicolare a un campo magnetico di  $0.48 \text{ T}$  rivolto verso l'alto. In  $0.14 \text{ s}$ , il campo viene modificato in  $0.25 \text{ T}$  ora rivolto verso il basso. Qual è la f.e.m. media indotta nella bobina?
7. (II) Il solenoide della **Figura 29.47** viene allontanato dalla spira conduttrice. Qual è il verso della corrente indotta nella spira?



**Figura 29.47** Problema 7.

te sull'intera area delle orbite circolari. (Questa è la ragione per cui le espansioni polari del magnete hanno un profilo irregolare, come illustrato nella Figura 29.57.)

## ► Problemi generali

59. Una spira quadrata di lato 27.0 cm ha resistenza di 8.80  $\Omega$ . La spira viene posta inizialmente in un piano ortogonale a un campo magnetico di intensità 0.755 T e poi viene estratta rapidamente in 40.0 ms. Calcolate l'energia elettrica dissipata nel processo.
60. Una centrale elettrica opera a 24 kV in uscita e dista 75 km da una cittadina che necessita di 65 MW di potenza a 12 kV. Due linee di trasmissione collegano la centrale alla città, ed entrambe hanno resistenza 0.10  $\Omega$ /km. Quanto deve valere la tensione d'uscita del trasformatore collegato alla centrale per assicurare un'efficienza globale di trasmissione pari al 98.5%? Assumete che il trasformatore sia ideale.
61. Una spira circolare, la cui area vale 12 m<sup>2</sup>, racchiude un campo magnetico ortogonale al piano della spira, di intensità pari a  $B(t) = (8.0 \text{ T/s})t$ . La spira è collegata in serie a una resistenza di 7.5  $\Omega$  e a un condensatore di 6.5 pF. Nel caso il condensatore venga caricato completamente, quanto vale la carica immagazzinata?
62. L'avvolgimento primario di un trasformatore di efficienza pari all'85% è collegato a una rete in alternata da 110 V. L'avvolgimento secondario è collegato a una lampadina da 75 W la cui resistenza vale 2.4  $\Omega$ . (a) Calcolate la corrente nell'avvolgimento primario del trasformatore. (b) Calcolate il rapporto tra il numero delle spire del primario e quello del secondario.
63. Una coppia di linee di trasmissione con resistenza da 0.80  $\Omega$  trasportano una corrente di 680 A per 9.0 km. Il valore efficace (rms) della tensione di ingresso vale 42 kV. Calcolate (a) la tensione al capo opposto, (b) la potenza in ingresso, (c) la potenza dissipata lungo le linee e (d) la potenza in uscita.
64. Dimostrate che la potenza dissipata  $P_L$  lungo le linee di trasmissione è data dalla formula  $P_L = (P_T)^2 R_L / V^2$ , dove  $P_T$  è la potenza trasmessa all'utente,  $V$  è la tensione in uscita e  $R_L$  è la resistenza delle linee.
65. Una lampada da tavolo ha una potenza di 35 W e opera a 12 V. La lampada è dotata di un trasformatore che converte la tensione di 120 V della rete domestica ai 12 V richiesti. (a) Il trasformatore opera in salita o in discesa? (b) Quanto vale la corrente nell'avvolgimento secondario quando la lampada è accesa? (c) Quanto vale la corrente nell'avvolgimento primario? (d) Quanto vale la resistenza della lampada quando è accesa?
66. Due binari di resistenza trascurabile vengono posti alla distanza di 32 cm su una rampa inclinata di 6.0° rispetto all'orizzontale. I due binari in basso sono collegati mediante una resistenza di 0.60  $\Omega$ . In cima, invece, essi vengono collegati mediante una barretta di rame di resistenza trascurabile e massa 0.040 kg. L'intero ap-

58. (III) Trovate una formula per esprimere in funzione del tempo il campo elettrico netto che agisce sulla barretta in movimento del Problema 30 per entrambi i casi (a) e (b).

parato è immerso in un campo magnetico verticale di intensità pari a 0.65 T. Calcolate la velocità limite (in condizioni stazionarie) della barretta assumendo che possa scivolare senza attrito lungo i binari.

67. Con riferimento alla Figura 29.58, un avvolgimento di 160 spire, di raggio 5.0 cm e resistenza 12  $\Omega$  circonda un solenoide dotato di 230 spire per centimetro e raggio di 4.5 cm. La corrente nel solenoide varia a tasso costante da 0 a 2.0 A in 0.10 s. Calcolate l'intensità e il verso della corrente indotta nell'avvolgimento esterno.

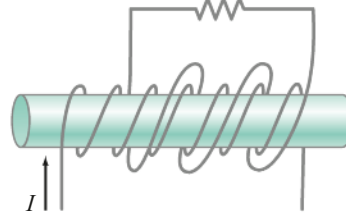


Figura 29.58 Problema 67.

68. Un avvolgimento di rilevazione utile a misurare un campo magnetico (detto anche **bobina-flip**) è una piccola bobina dotata di  $N$  spire, ognuna con la sua area  $A$ . Esso è collegato a un **galvanometro balistico**, che è uno strumento atto a misurare la carica totale  $Q$  che lo attraversa in un breve lasso di tempo. La bobina-flip viene posta nel campo magnetico da misurare in modo tale che il suo piano sia ortogonale alla direzione del campo magnetico. Essa viene poi rapidamente ruotata di 180° attorno a un suo diametro. Dimostrate che la carica totale  $Q$  che scorre nella corrente indotta durante il breve intervallo di tempo necessario alla rotazione (flip) è proporzionale al campo magnetico da misurare. In particolare, dimostrate che per il campo magnetico  $B$  vale:

$$B \propto \frac{QR}{2NA}$$

dove  $R$  è la resistenza totale del circuito, inclusa quella dell'avvolgimento e quella del galvanometro balistico che misura la carica  $Q$ .

69. Un anello di raggio 3.0 cm e resistenza 0.035  $\Omega$  viene fatto ruotare di 90° attorno a un asse passante per un diametro in presenza di un campo magnetico di 0.23 T, ortogonale all'asse in questione. Qual è il numero massimo di elettroni che passerà attraverso un punto prefissato dell'anello durante questo processo?
70. È possibile costruire un flash che opera per via di una corrente indotta da un magnete che si muove in un avvolgimento conduttore. L'avvolgimento e il magnete sono contenuti in un tubo di plastica che può essere agitato in modo che il magnete si muova avanti e



# Fisica 2

## Elettromagnetismo ■ Ottica

Terza edizione

### L'autore

**Douglas C. Giancoli** si è laureato in Fisica alla University of California a Berkeley, ha conseguito il Master of Science in Fisica al MIT e il dottorato (PhD) in Fisica delle particelle elementari, sempre a Berkeley. Ha fatto ricerca, sviluppando competenze in Biologia molecolare e in Biofisica, e ha tenuto molti corsi universitari, di taglio sia tradizionale sia innovativo.

È autore anche di *Fisica* (terza edizione, 2017) e *Fisica con Fisica moderna* (terza edizione, 2017), presenti nel catalogo CEA.

La *Fisica 2* di Giancoli offre una conoscenza approfondita dei concetti base dell'**elettromagnetismo** e dell'**ottica** e mostra quanto la fisica sia rilevante nella vita quotidiana per le sue applicazioni alla biologia, alla medicina, all'ingegneria, all'elettronica e all'architettura.

Ogni argomento è introdotto da un'esperienza tratta dalla vita reale collegata ad alcune *domande a scelta multipla*, che includono tra le risposte possibili anche le nozioni preconcepite più comuni, da "smontare" nel corso del capitolo. Alle generalizzazioni e agli aspetti più formali si arriva gradualmente, con un approccio che rispecchia il modo in cui la scienza viene praticata.

Molto spazio è dedicato alle tecniche che permettono di risolvere i problemi, un aspetto cruciale nell'apprendimento della fisica:

- nel corso del testo ci sono *Esercizi* da svolgere immediatamente (le soluzioni sono in fondo al capitolo) ed *Esempi* completamente risolti, alcuni dei quali sono *Esempi di stima*, per imparare a ottenere risultati approssimati anche con un numero limitato di informazioni, mentre altri sono *Esempi concettuali*, che pongono domande-chiave su cui ragionare;
- in ogni capitolo sono presenti *Guide alla risoluzione dei problemi*, nelle quali problemi relativi a un determinato argomento sono risolti passo a passo;
- alla fine di ogni capitolo si trovano *Quesiti e convinzioni errate*, cioè test a risposta multipla che offrono alla valutazione anche soluzioni errate spesso basate sul senso comune, e una serie di *Problemi*, alcuni riferiti ai singoli paragrafi e classificati su tre livelli di difficoltà, e altri più impegnativi, chiamati *Problemi generali*.

Gli strumenti matematici più importanti sono introdotti via via dove servono e nelle spiegazioni formali sono inclusi tutti i passaggi. Nelle *Appendici* sono trattati derivate e integrali, oltre ad argomenti più complessi, come l'integrazione numerica, il campo gravitazionale della distribuzione sferica di massa e gli isotopi nucleari, e sono raccolti altri dati utili, fattori di conversione, formule matematiche e la tavola periodica.



### Risorse online

A questo indirizzo si può accedere al sito di complemento al libro [online.universita.zanichelli.it/giancolifisica2-3e](http://online.universita.zanichelli.it/giancolifisica2-3e)



### Ebook

Chi acquista il libro nuovo può accedere gratuitamente all'ebook, seguendo le istruzioni presenti nel sito.



### Esercizi interattivi

Il sistema di esercizi interattivi per studenti e docenti, con classe virtuale.



Per l'accesso registrarsi su [my.zanichelli.it](http://my.zanichelli.it) e abilitare le risorse.

Maggiori informazioni nelle pagine iniziali del libro.

L'accesso all'ebook e alle risorse digitali protette è personale, non condivisibile e non cedibile, né autonomamente né con la cessione del libro cartaceo.

GIANCOLI\*FISICA 2 3ED (CEA LUMKQ)  
ISBN 978-88-08-16545-9



9 788808 165459

4 5 6 7 8 9 0 1 (64D)