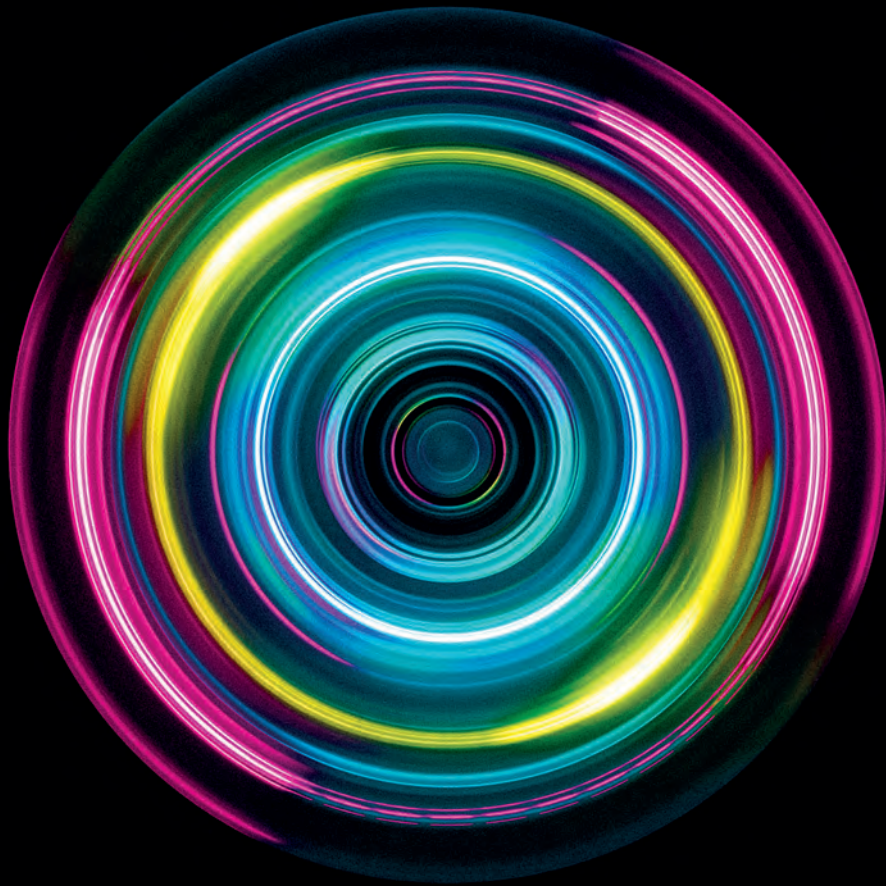


Jearl Walker

**Halliday - Resnick**  
**Fondamenti**  
**di fisica**

Meccanica • Onde • Termodinamica  
Elettromagnetismo • Ottica

Ottava edizione italiana condotta  
sull'undicesima edizione americana



Jearl Walker

# Halliday - Resnick Fondamenti di fisica

Meccanica • Onde • Termodinamica  
Elettromagnetismo • Ottica

Ottava edizione italiana condotta  
sull'undicesima edizione americana

A cura di Dario Gerace

## 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.

Titolo originale: *Fundamentals of Physics, Extended*, 12th Edition by David Halliday, Robert Resnick and Jearl Walker  
Copyright © 2022, 2014, 2011, 2008, 2005 John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.  
This translation published under license with the original publisher John Wiley & Sons, Inc.

© 2023, 2015, 2006, 2001, 1998, 1995, 1984, 1977 CEA – Casa Editrice Ambrosiana, viale Romagna 5, 20089 Rozzano (MI) [89977]  
CEA – Casa Editrice Ambrosiana è un marchio editoriale di Zanichelli editore S.p.A.

Traduzione: studio QB, Bologna, basata sul testo della settima edizione italiana tradotta da Lanfranco Cicala.

Revisione: Dario Gerace

#### 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 [ufficicontratti@zanichelli.it](mailto:ufficicontratti@zanichelli.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 ma superiore 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 [tdm@zanichelli.it](mailto:tdm@zanichelli.it)

Redazione: studio QB, Bologna

Impaginazione e indice analitico: Epitesto, Milano

Copertina:

- Progetto grafico: Falcinelli & Co., Roma

- Immagine di copertina: © 2018 Sunyixun/Getty Images

Prima edizione italiana: 1977

Seconda edizione italiana: 1984

Terza edizione italiana: febbraio 1995

Quarta edizione italiana: ottobre 1998

Quinta edizione italiana: settembre 2001

Sesta edizione italiana: gennaio 2006

Settima edizione italiana: maggio 2015

Ottava edizione italiana: novembre 2023

Ristampa: **prima tiratura**

5    4    3    2    1

2023    2024    2025    2026    2027

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: [segreteria\\_cea@ceaedizioni.it](mailto:segreteria_cea@ceaedizioni.it)

Per comunicazioni di tipo commerciale rivolgersi a: [universita@zanichelli.it](mailto:universita@zanichelli.it)

Stampa:

per conto di Zanichelli editore S.p.A.

Via Innerio 34, 40126 Bologna

# Indice generale

Prefazione	X	Sintesi	74
Ringraziamenti	XII	Domande	75
Tavole matematiche e fisiche	XIV	Problemi	76
		Problemi di riepilogo	82
<b>CAPITOLO 1</b>			
<b>Misure</b>	1		
1.1 Misurare le grandezze, lunghezze comprese	1		
1.2 Tempo	5		
1.3 Massa	6		
Sintesi	7		
Problemi	8		
Problemi di riepilogo	9		
<b>CAPITOLO 2</b>			
<b>Moto rettilineo</b>	12		
2.1 Posizione, spostamento e velocità media	12		
2.2 Velocità istantanea: vettoriale e scalare	16		
2.3 Accelerazione	18		
2.4 Accelerazione costante	20		
2.5 Accelerazione in caduta libera	24		
2.6 Integrazione con il metodo grafico nell'analisi del moto	25		
Sintesi	27		
Domande	28		
Problemi	29		
Problemi di riepilogo	34		
<b>CAPITOLO 3</b>			
<b>Vettori</b>	39		
3.1 Vettori e loro componenti	39		
3.2 Versori: sommare i vettori in componenti	44		
3.3 Moltiplicare i vettori	46		
Sintesi	50		
Domande	51		
Problemi	52		
Problemi di riepilogo	54		
<b>CAPITOLO 4</b>			
<b>Moto in due e tre dimensioni</b>	58		
4.1 Posizione e spostamento	58		
4.2 Velocità media e velocità istantanea	60		
4.3 Accelerazione media e accelerazione istantanea	62		
4.4 Moto di un proiettile	64		
4.5 Moto circolare uniforme	69		
4.6 Moto relativo in una dimensione	71		
4.7 Moto relativo in due dimensioni	73		
<b>CAPITOLO 5</b>			
<b>Forza e moto • 1</b>			87
5.1 Prima e seconda legge di Newton			87
5.2 Alcune forze particolari			94
5.3 Applicare le leggi di Newton			98
Sintesi			105
Domande			105
Problemi			107
Problemi di riepilogo			113
<b>CAPITOLO 6</b>			
<b>Forza e moto • 2</b>			115
6.1 Attrito			115
6.2 Resistenza del mezzo e velocità limite			120
6.3 Moto circolare uniforme			122
Sintesi			126
Domande			126
Problemi			127
Problemi di riepilogo			132
<b>CAPITOLO 7</b>			
<b>Energia cinetica e lavoro</b>			137
7.1 Energia cinetica			137
7.2 Lavoro ed energia cinetica			139
7.3 Lavoro compiuto dalla forza gravitazionale			142
7.4 Lavoro compiuto dalla forza elastica			146
7.5 Lavoro compiuto da una generica forza variabile			149
7.6 Potenza			152
Sintesi			154
Domande			154
Problemi			156
Problemi di riepilogo			159
<b>CAPITOLO 8</b>			
<b>Energia potenziale e conservazione dell'energia</b>			163
8.1 Energia potenziale			163
8.2 Conservazione dell'energia meccanica			169
8.3 Leggere il grafico dell'energia potenziale			172
8.4 Lavoro compiuto su un sistema da una forza esterna			175

<b>8.5 Conservazione dell'energia</b>	178
Sintesi	182
Domande	183
Problemi	184
Problemi di riepilogo	190

**CAPITOLO 9**

<b>Centro di massa e quantità di moto</b>	197
<b>9.1 Centro di massa</b>	197
<b>9.2 Seconda legge di Newton per un sistema di punti materiali</b>	200
<b>9.3 Quantità di moto o momento lineare</b>	203
<b>9.4 Urto e impulso</b>	205
<b>9.5 Conservazione della quantità di moto</b>	208
<b>9.6 Quantità di moto ed energia cinetica negli urti</b>	211
<b>9.7 Urto elastico in una dimensione</b>	214
<b>9.8 Urto in due dimensioni</b>	217
<b>9.9 Sistema a massa variabile: un razzo</b>	218
Sintesi	220
Domande	221
Problemi	222
Problemi di riepilogo	229

**CAPITOLO 10**

<b>Rotazione</b>	234
<b>10.1 Variabili rotazionali</b>	234
<b>10.2 Rotazione con accelerazione angolare costante</b>	240
<b>10.3 Relazioni tra variabili lineari e angolari</b>	242
<b>10.4 Energia cinetica rotazionale</b>	245
<b>10.5 Calcolare il momento d'inerzia</b>	247
<b>10.6 Momento torcente</b>	250
<b>10.7 Seconda legge di Newton per il moto rotatorio</b>	252
<b>10.8 Lavoro ed energia cinetica rotazionale</b>	254
Sintesi	257
Domande	258
Problemi	259
Problemi di riepilogo	263

**CAPITOLO 11**

<b>Rotolamento, momento torcente e momento angolare</b>	267
<b>11.1 Rotolamento come combinazione di traslazione e rotazione</b>	267
<b>11.2 Forze ed energia cinetica nel rotolamento</b>	269
<b>11.3 Lo yo-yo</b>	272
<b>11.4 Momento torcente rivisitato</b>	273
<b>11.5 Momento angolare</b>	275
<b>11.6 Seconda legge di Newton in forma angolare</b>	277
<b>11.7 Momento angolare di un corpo rigido</b>	279
<b>11.8 Conservazione del momento angolare</b>	282
<b>11.9 Moto di precessione di un giroscopio</b>	286
Sintesi	288
Domande	288
Problemi	289
Problemi di riepilogo	295

**CAPITOLO 12**

<b>Equilibrio ed elasticità</b>	297
<b>12.1 Equilibrio</b>	297
<b>12.2 Alcuni esempi di equilibrio statico</b>	301
<b>12.3 Elasticità</b>	306
Sintesi	311
Domande	311
Problemi	313
Problemi di riepilogo	319

**CAPITOLO 13**

<b>Gravitazione</b>	323
<b>13.1 Newton e la legge della gravitazione universale</b>	323
<b>13.2 Gravitazione e principio di sovrapposizione</b>	326
<b>13.3 Gravitazione in prossimità della superficie terrestre</b>	328
<b>13.4 Gravitazione dentro la Terra</b>	331
<b>13.5 Energia potenziale gravitazionale</b>	332
<b>13.6 Pianeti e satelliti: le leggi di Keplero</b>	336
<b>13.7 Satelliti: orbite ed energia</b>	339
<b>13.8 Einstein e la gravitazione</b>	341
Sintesi	344
Domande	345
Problemi	346
Problemi di riepilogo	351

**CAPITOLO 14**

<b>Fluidi</b>	353
<b>14.1 Fluidi, densità e pressione</b>	353
<b>14.2 Fluidi a riposo</b>	355
<b>14.3 Misurare la pressione</b>	358
<b>14.4 Principio di Pascal</b>	359
<b>14.5 Principio di Archimede</b>	361
<b>14.6 Equazione di continuità</b>	365
<b>14.7 Equazione di Bernoulli</b>	368
Sintesi	370
Domande	371
Problemi	372
Problemi di riepilogo	378

**CAPITOLO 15**

<b>Oscillazioni</b>	381
<b>15.1 Moto armonico semplice</b>	381
<b>15.2 Energia nel moto armonico semplice</b>	388
<b>15.3 Oscillatore armonico semplice angolare</b>	390
<b>15.4 Pendoli e moto circolare</b>	391
<b>15.5 Moto armonico semplice smorzato</b>	395
<b>15.6 Oscillazioni forzate e risonanza</b>	397
Sintesi	399
Domande	399
Problemi	401
Problemi di riepilogo	405

## CAPITOLO 16

**Onde • 1**

16.1	Onde trasversali	409
16.2	Velocità di un'onda che si propaga lungo una corda	409
16.3	Energia e potenza di un'onda che si propaga lungo una corda	416
16.4	Equazione delle onde	417
16.5	Interferenza tra onde	419
16.6	Fasori	421
16.7	Onde stazionarie e risonanza	425
	Sintesi	427
	Domande	431
	Problemi	432
	Problemi di riepilogo	433

## CAPITOLO 17

**Onde • 2**

17.1	Velocità del suono	440
17.2	Onde sonore che si propagano	440
17.3	Interferenza	443
17.4	Intensità e livello sonoro	445
17.5	Sorgenti di note musicali	448
17.6	Battimenti	450
17.7	Effetto Doppler	454
17.8	Velocità supersoniche e onde d'urto	455
	Sintesi	459
	Domande	460
	Problemi	460
	Problemi di riepilogo	461

## CAPITOLO 18

**Temperatura, calore e primo principio della termodinamica**

18.1	Temperatura	470
18.2	Scale Celsius e Fahrenheit	470
18.3	Dilatazione termica	473
18.4	Assorbimento di calore	475
18.5	Primo principio della termodinamica	477
18.6	Meccanismi di trasmissione del calore	483
	Sintesi	488
	Domande	493
	Problemi	494
	Problemi di riepilogo	495

## CAPITOLO 19

**Teoria cinetica dei gas**

19.1	Numero di Avogadro	503
19.2	Gas perfetti	503
19.3	Pressione, temperatura e velocità quadratica media	504
19.4	Energia cinetica traslazionale	507
19.5	Cammino libero medio	510

19.6	Distribuzione delle velocità molecolari	512
19.7	Calori specifici molari di un gas perfetto	515
19.8	Gradi di libertà e calori specifici molari	519
19.9	Espansione adiabatica di un gas perfetto	522
	Sintesi	526
	Domande	526
	Problemi	527
	Problemi di riepilogo	531

## CAPITOLO 20

**Entropia e secondo principio della termodinamica**

20.1	Entropia	533
20.2	Entropia nel mondo reale: le macchine termiche	533
20.3	Frigoriferi e macchine reali	539
20.4	Una prospettiva statistica sull'entropia	544
	Sintesi	546
	Domande	550
	Problemi	551
	Problemi di riepilogo	555

## CAPITOLO 21

**Legge di Coulomb**

21.1	Legge di Coulomb	557
21.2	La carica è quantizzata	557
21.3	La carica si conserva	566
	Sintesi	568
	Domande	570
	Problemi	570
	Problemi di riepilogo	572

## CAPITOLO 22

**Campi elettrici**

22.1	Campo elettrico	578
22.2	Campo elettrico generato da una carica puntiforme	578
22.3	Campo elettrico generato da un dipolo	580
22.4	Campo elettrico generato da una distribuzione lineare di carica	582
22.5	Campo elettrico generato da un disco carico	584
22.6	Carica puntiforme in un campo elettrico	589
22.7	Dipolo in un campo elettrico	590
	Sintesi	595
	Domande	596
	Problemi	597
	Problemi di riepilogo	602

## CAPITOLO 23

**Legge di Gauss**

23.1	Flusso del campo elettrico	604
23.2	Legge di Gauss	604
23.3	Conduttore carico isolato	609
23.4	Applicare la legge di Gauss: simmetria cilindrica	612

23.5	Applicare la legge di Gauss: simmetria piana	616
23.6	Applicare la legge di Gauss: simmetria sferica	619
	Sintesi	620
	Domande	621
	Problemi	622
	Problemi di riepilogo	626

**CAPITOLO 24****Potenziale elettrico**

24.1	Potenziale elettrico	629
24.2	Superfici equipotenziali e campo elettrico	629
24.3	Potenziale dovuto a una particella carica	633
24.4	Potenziale dovuto a un dipolo elettrico	636
24.5	Potenziale dovuto a una distribuzione continua di carica	639
24.6	Calcolare il campo dal potenziale	640
24.7	Energia potenziale elettrica di un sistema di particelle cariche	642
24.8	Potenziale di un conduttore carico isolato	644
	Sintesi	646
	Domande	648
	Problemi	649
	Problemi di riepilogo	650

**CAPITOLO 25****Capacità elettrica**

25.1	Capacità elettrica	659
25.2	Calcolare la capacità elettrica	659
25.3	Condensatori in serie e in parallelo	661
25.4	Energia immagazzinata in un campo elettrico	664
25.5	Condensatore con un dielettrico	668
25.6	Dielettrici e legge di Gauss	671
	Sintesi	673
	Domande	676
	Problemi	676
	Problemi di riepilogo	677

**CAPITOLO 26****Corrente elettrica e resistenza**

26.1	Corrente elettrica	683
26.2	Densità di corrente	683
26.3	Resistenza e resistività	686
26.4	Legge di Ohm	689
26.5	Potenza, semiconduttori, superconduttori	693
	Sintesi	696
	Domande	699
	Problemi	700
	Problemi di riepilogo	701

**CAPITOLO 27****Circuiti**

27.1	Circuiti a maglia singola	706
27.2	Circuiti a più maglie	706
27.3	Amperometro e voltmetro	714

27.4	Circuiti RC	720
	Sintesi	724
	Domande	725
	Problemi	726
	Problemi di riepilogo	732

**CAPITOLO 28****Campo magnetico**

28.1	Campo magnetico e definizione di $B$	736
28.2	Campi incrociati: la scoperta dell'elettrone	736
28.3	Campi incrociati: l'effetto Hall	740
28.4	Particella carica in moto circolare	742
28.5	Ciclotroni e sincrotroni	745
28.6	Forza magnetica che agisce su un filo percorso da corrente	749
28.7	Momento torcente che agisce su una spira percorsa da corrente	751
28.8	Momento di dipolo magnetico	753
	Sintesi	755
	Domande	757
	Problemi	759
	Problemi di riepilogo	764

**CAPITOLO 29****Campi magnetici generati da correnti**

29.1	Campi magnetici generati da correnti	766
29.2	Forza tra due correnti parallele	766
29.3	Legge di Ampère	771
29.4	Solenoidi e toroidi	772
29.5	Dipolo magnetico costituito da una bobina percorsa dalla corrente	776
	Sintesi	779
	Domande	781
	Problemi	781
	Problemi di riepilogo	782

**CAPITOLO 30****Induzione e induttanza**

30.1	Legge di Faraday e legge di Lenz	791
30.2	Induzione e trasferimenti di energia	791
30.3	Campi elettrici indotti	798
30.4	Induttori e induttanze	801
30.5	Autoinduzione	804
30.6	Circuiti RL	806
30.7	Energia immagazzinata in un campo magnetico	807
30.8	Densità di energia in un campo magnetico	810
30.9	Mutua induzione	812
	Sintesi	813
	Domande	815
	Problemi	815
	Problemi di riepilogo	817

## CAPITOLO 31

**Oscillazioni elettromagnetiche e corrente alternata**

31.1	Oscillazioni <i>LC</i>	826
31.2	Oscillazioni smorzate in un circuito <i>RLC</i>	826
31.3	Oscillazioni forzate in tre circuiti semplici	832
31.4	Circuito <i>RLC</i> in serie	834
31.5	Potenza nei circuiti in corrente alternata	841
31.6	Trasformatori	847
	Sintesi	849
	Domande	853
	Problemi	854
	Problemi di riepilogo	855

## CAPITOLO 32

**Equazioni di Maxwell e magnetismo della materia**

32.1	Legge di Gauss per i campi magnetici	861
32.2	Campi magnetici indotti	861
32.3	Corrente di spostamento	863
32.4	Magneti	865
32.5	Magnetismo ed elettroni	868
32.6	Diamagnetismo	870
32.7	Paramagnetismo	874
32.8	Ferromagnetismo	876
	Sintesi	878
	Domande	881
	Problemi	882
	Problemi di riepilogo	883

## CAPITOLO 33

**Onde elettromagnetiche**

33.1	Onde elettromagnetiche	889
33.2	Trasporto di energia e vettore di Poynting	889
33.3	Pressione di radiazione	896
33.4	Polarizzazione	898
33.5	Riflessione e rifrazione	900
33.6	Riflessione interna totale	904
33.7	Polarizzazione per riflessione	909
	Sintesi	911
	Domande	913
	Problemi	913
	Problemi di riepilogo	915

## CAPITOLO 34

**Immagini**

34.1	Immagini e specchi piani	920
------	--------------------------	-----

34.2	Specchi sferici	923
34.3	Superfici rifrangenti sferiche	927
34.4	Lenti sottili	932
34.5	Strumenti ottici	935
34.6	Tre dimostrazioni	941
	Sintesi	944
	Domande	946
	Problemi	947
	Problemi di riepilogo	948

## CAPITOLO 35

**Interferenza**

35.1	Luce come onda	952
35.2	Esperimento di Young sull'interferenza	955
35.3	Interferenza e intensità da doppia fenditura	960
35.4	Interferenza da pellicole sottili	964
35.5	Interferometro di Michelson	968
	Sintesi	975
	Domande	977
	Problemi	978
	Problemi di riepilogo	979

## CAPITOLO 36

**Diffrazione**

36.1	Diffrazione da singola fenditura	984
36.2	Intensità nella diffrazione da singola fenditura	987
36.3	Diffrazione attraverso un'apertura circolare	991
36.4	Diffrazione da una doppia fenditura	996
36.5	Reticoli di diffrazione	999
36.6	Reticoli: dispersione e potere di risoluzione	1002
36.7	Diffrazione dei raggi X	1005
	Sintesi	1007
	Domande	1010
	Problemi	1010
	Problemi di riepilogo	1011

**Appendici**

A	Sistema Internazionale di unità di misura (SI)	A-1
B	Alcune costanti fondamentali della fisica	A-3
C	Alcuni dati astronomici	A-4
D	Fattori di conversione	A-5
E	Formule matematiche	A-9
F	Proprietà degli elementi	A-11
G	Tavola periodica degli elementi	A-14

	Crediti fotografici	C-1
--	---------------------	-----

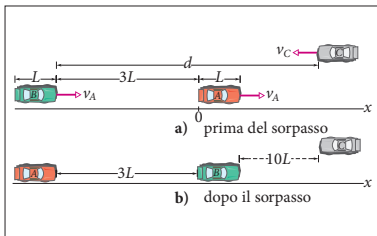
	Indice analitico	IA-1
--	------------------	------



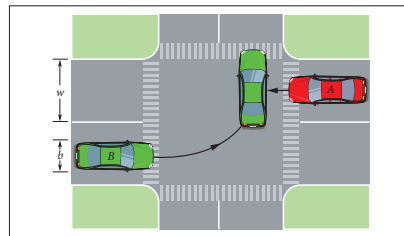
# Prefazione

Ecco una nuova edizione del libro di testo ideato da David Halliday e Robert Resnick nel 1963 e che io stesso ho usato da studente del primo anno al MIT. (Accidenti, il tempo è volato!)

Lavorare a questa nuova edizione mi ha permesso di scoprire molti nuovi esempi interessanti e di rivederne alcuni tra i miei preferiti delle edizioni precedenti. In questa pagina trovate alcuni casi di particolare interesse trattati in questa ottava edizione italiana di *Fondamenti di Fisica*.



**Figura 2.51** Come dovrebbe essere programmata l'auto a guida autonoma B affinché possa sorpassare in sicurezza l'auto A senza correre rischi a causa dell'auto C in arrivo?



**Figura 4.59** Nella manovra conosciuta come «la sinistra di Pittsburgh», un conducente nella corsia opposta anticipa il passaggio al semaforo verde e si porta rapidamente di fronte alla vostra auto mentre il semaforo è ancora rosso. Nella ricostruzione di un incidente, quanto tempo prima del verde il conducente ha iniziato la manovra?



**Figura 9.17** L'incidente d'auto più pericoloso è lo scontro frontale. In uno scontro di questo tipo tra automobili della stessa massa, quanto diminuisce la probabilità che un conducente muoia se nell'auto c'è un passeggero?



**Figura 9.87** Le cadute sono un problema cronico e serio per gli skater, i pattinatori, gli anziani, le persone che soffrono di crisi epilettiche, e molti altri. Spesso, queste persone cadono su una mano tesa, fratturandosi il polso. Da quale altezza la caduta può provocare una simile frattura?



**Figura 10.18a** Qual è l'aumento di tensione nei tendini d'Achille di una persona in piedi quando si indossano i tacchi alti?



**Figura 10.58a** Quale tensione era necessaria nel tendine d'Achille di Michael Jackson per sostenerlo rispetto alla forza di gravità durante il suo passo inclinato a 45° nel video musicale *Smooth Criminal*?



**Figura 28.18** La terapia a fasci di neutroni veloci è un'arma promettente contro i tumori maligni delle ghiandole salivari. Ma come fanno delle particelle elettricamente neutre a essere accelerate ad alta velocità?



**Figura 29.87** Il morbo di Parkinson e altre patologie cerebrali sono state trattate con la stimolazione magnetica transcranica, nella quale dei campi magnetici pulsati forzano i neuroni a scaricarsi, alla profondità di diversi centimetri.



**Figura 34.27** Nella spettroscopia funzionale nel vicino infrarosso (*functional Near-Infra-Red-Spectroscopy*, fNIRS) una persona indossa uno stretto copricapo con alcuni LED che emettono luce nel vicino infrarosso. La luce può penetrare nello strato esterno del cervello e rivelare quale area è attivata da una data attività, per esempio dal giocare a baseball.

Inoltre, in questa edizione si parla anche di:

- rilevamento a distanza della caduta di una persona anziana,
- illusione data da una palla veloce che sale,
- come colpire una palla veloce nonostante la perdita momentanea della vista,
- effetto squat per una nave che viaggia a profondità maggiore in un canale,
- la tipica situazione di pericolo in cui un ciclista scompare dalla vista a un incrocio,
- misura dei potenziali di un temporale con i muoni,

e molto altro.

## CHE COSA C'È DI NUOVO?

- *Verifiche*, una per ogni paragrafo
- *Problemi svolti*
- *Sintesi* alla fine di ogni capitolo
- Circa 300 *nuovi problemi* di fine capitolo
- *Soluzioni dettagliate*, disponibili online in lingua inglese, per i problemi di fine capitolo indicati con **MS**

Nel progettare questa nuova edizione, mi sono concentrato su alcune aree della ricerca che mi interessano in particolar modo e ho scritto nuove spiegazioni nel testo e molti nuovi esercizi e problemi da svolgere.

Per esempio, osserviamo la prima immagine di un buco nero (che ho atteso tutta la vita) e poi esaminiamo le onde gravitazionali (un argomento di cui ho discusso con Rainer Weiss al MIT quando lavoravo nel suo laboratorio, diversi anni prima che gli venisse l'idea di usare un interferometro come rivelatore di onde).

Ho scritto un nuovo problema svolto e diversi esercizi da svolgere sulle auto a guida autonoma, nelle quali un computer deve elaborare procedure di guida sicure, come il sorpasso di un'auto che viaggia lentamente mentre un'altra auto è in arrivo nella corsia di sorpasso.

Ho esplorato la radioterapia per il cancro, incluso l'uso degli elettroni di Augur-Meitner, che furono compresi per la prima volta da Lise Meitner.

Ho setacciato migliaia di articoli di ricerca in ambito medico, ingegneristico e fisico per trovare modi intelligenti di guardare all'interno del corpo umano senza un largo impiego di chirurgie invasive. Eccone tre esempi.

1. La **chirurgia robotica**, che usa incisioni a porta singola e fibre ottiche, permette ora ai chirurghi di accedere agli organi interni con tempi di guarigione per il paziente di poche ore anziché di giorni o settimane, come accadeva con le precedenti tecniche chirurgiche.
2. La **stimolazione magnetica transcranica** è usata per trattare la depressione cronica, il morbo di Parkinson e altre patologie cerebrali, applicando campi magnetici pulsati generati da bobine vicine allo scalpo, per forzare i neuroni alla profondità di diversi centimetri a scaricarsi.
3. La **magnetoencefalografia** (MEG) viene usata per monitorare il cervello di una persona mentre questa compie un'azione come leggere. L'azione del cervello fa sì che deboli impulsi elettrici siano inviati lungo percorsi di conduzione tra le cellule cerebrali e che ciascun impulso produca un debole campo magnetico, che viene rilevato da dispositivi superconduttori a interferenza quantistica (SQUID) estremamente sensibili.

## LE RISORSE MULTIMEDIALI

[online.universita.zanichelli.it/halliday-fond8e](http://online.universita.zanichelli.it/halliday-fond8e)

A questo indirizzo sono disponibili le risorse multimediali di complemento al libro. Per accedere alle risorse protette è necessario registrarsi su [my.zanichelli.it](http://my.zanichelli.it) seguendo le istruzioni riportate nella prima pagina del libro.

### Libro con ebook

Chi acquista il libro può accedere gratuitamente all'ebook, online e offline, seguendo le istruzioni presenti nella prima pagina del libro. L'ebook si legge offline anche con l'applicazione *Booktab Z*, che si scarica gratis da *App Store* (per *Apple*) o da *Google Play* (per *Android*). 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.

# Legge di Coulomb

## 21.1 LEGGE DI COULOMB

### Idee chiave

- L'intensità dell'interazione elettrica di una particella con gli oggetti che la circondano dipende dalla sua carica elettrica (di solito indicata con  $q$ ), che può essere positiva o negativa. Le particelle con cariche dello stesso segno si respingono, mentre le particelle con cariche di segno opposto si attraggono.
- Un oggetto con la stessa quantità di ciascun tipo di carica è elettricamente neutro, mentre nel caso in cui ci sia uno squilibrio tra i due tipi di carica, l'oggetto è elettricamente carico e possiede un eccesso di carica.
- I conduttori sono materiali nei quali un significativo numero di elettroni è libero di muoversi. Le particelle cariche nei materiali non conduttori (isolanti) non sono libere di muoversi.
- L'intensità della corrente elettrica  $i$  è la rapidità  $dq/dt$  con la quale la carica passa attraverso un punto:

$$i = \frac{dq}{dt}$$

- La legge di Coulomb descrive la forza elettrostatica (o elettrica) che agisce tra due particelle cariche. Se le particelle hanno cariche  $q_1$  e  $q_2$ , sono separate da una distanza  $r$  e sono a riposo (o si muovono solo lentamente) l'una rispetto all'altra, il modulo della forza che agisce su ciascuna particella per effetto dell'altra è dato da

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{r^2} \quad (\text{legge di Coulomb})$$

dove  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$  è la costante dielettrica del vuoto. Il rapporto  $1/(4\pi\epsilon_0)$  è spesso indicato come costante elettrostatica (o costante di Coulomb)

$$k = 8,99 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2.$$

- Il vettore della forza elettrostatica che agisce su una particella carica per effetto di una seconda particella carica è diretto verso la seconda particella (per cariche di segno opposto) o nel verso opposto (per cariche dello stesso segno).
- Se più forze elettrostatiche agiscono su una particella, la forza risultante è la somma vettoriale (non la somma scalare) delle singole forze.
- Primo teorema del guscio: una particella carica posta all'esterno di un guscio sferico in cui la carica è uniformemente distribuita sulla superficie è attratta o respinta come se la carica del guscio fosse concentrata in una singola particella posta al centro del guscio.
- Secondo teorema del guscio: una particella carica posta all'interno di un guscio sferico in cui la carica è uniformemente distribuita sulla superficie non risente di alcuna forza risultante dovuta al guscio.
- La carica su un guscio sferico conduttore si distribuisce uniformemente sulla sua superficie (esterna).

### Che cos'è l'elettromagnetismo?

Siete circondati da dispositivi il cui funzionamento è basato sulla fisica dell'elettromagnetismo, che è una combinazione di fenomeni elettrici e magnetici. È da questa branca della fisica che originano computer, televisione, radio, telecomunicazioni, illuminazione domestica e perfino la capacità della pellicola per conservare i cibi di attaccarsi a un contenitore. Questa parte della fisica è anche la base del mondo naturale: non solo tiene assieme tutti gli atomi e le molecole del mondo, ma genera anche fulmini, aurore e arcobaleni.

I primi a studiare la fisica dell'elettromagnetismo sono stati i filosofi dell'antica Grecia, che scoprirono che se un pezzetto d'ambra viene strofinato e poi avvicinato a pezzetti di paglia, la paglia salta sull'ambra. Oggi sappiamo che l'attrazione tra l'ambra e la paglia è dovuta a una forza elettrica. I filosofi greci avevano anche scoperto che se un certo tipo di pietra (un magnete presente in natura) è avvicinato a dei pezzetti di ferro, questi saltano sulla pietra. Oggi sappiamo che l'attrazione tra il magnete e il ferro è dovuta a una forza magnetica.

A partire da queste semplici origini legate agli studi dei filosofi greci, le scienze dell'elettricità e del magnetismo si sono sviluppate separatamente per secoli, di fatto fino al 1820, quando Hans Christian Oersted trovò una connessione tra esse: una corrente elettrica che scorre in un filo può deviare l'ago di una bussola magnetica. È interessante il fatto che Oersted fece questa scoperta, che fu una grande sorpresa, mentre preparava una lezione dimostrativa per i suoi studenti di fisica.

La nuova scienza dell'elettromagnetismo fu sviluppata ulteriormente da studiosi di molti paesi. Uno dei più importanti fu Michael Faraday, un fisico sperimentale davvero molto dotato, con un talento per le intuizioni fisiche e la capacità di visualizzare i fenomeni. Tale talento è attestato dal fatto che i suoi appunti di

laboratorio non contengono neppure un'equazione. A metà del XIX secolo James Clerk Maxwell tradusse le idee di Faraday in forma matematica, introdusse molte sue nuove idee e pose l'elettromagnetismo su una solida base teorica.

La nostra discussione sull'elettromagnetismo è distribuita nei prossimi 16 capitoli. Cominciamo dai fenomeni elettrici, e il nostro primo passo è discutere la natura della carica elettrica e della forza elettrica.

## Carica elettrica

Qui presentiamo due esperimenti che sembrano essere frutto di magie, ma il nostro compito in questa sede è di dar loro un senso. Dopo aver strofinato una bacchetta di vetro con un panno di seta (in una giornata in cui l'umidità è bassa), la appendiamo mediante un filo fissato al suo centro (Figura 21.1a). Poi strofiniamo una seconda bacchetta di vetro con un panno di seta e la avviciniamo a quella appesa. Quest'ultima si allontana magicamente. Constatiamo che una forza la spinge lontano dalla seconda bacchetta, ma come? Non vi è contatto con quella bacchetta, non c'è un vento che la spinga e nemmeno un'onda sonora che la possa disturbare.

Nel secondo esperimento sostituiamo la seconda bacchetta con una bacchetta di plastica che è stata strofinata con una pelle di camoscio. Questa volta la bacchetta appesa, quando le avviciniamo la seconda bacchetta, si muove verso quest'ultima (Figura 21.1b). Come per la repulsione, questa attrazione avviene senza alcun contatto o altri evidenti scambi tra le bacchette.

Nel prossimo capitolo discuteremo di come la bacchetta appesa sappia della presenza delle altre bacchette, mentre in questo capitolo ci concentriamo solo sulle forze coinvolte. Nel primo esperimento la forza che agisce sulla bacchetta appesa è *repulsiva*, mentre nel secondo è *attrattiva*. Dopo aver condotto un gran numero di esperimenti, gli scienziati si sono resi conto che le forze in questo genere di esperimenti sono dovute alla *carica elettrica* che abbiamo fatto accumulare sulle bacchette quando queste sono a contatto con la seta o con la pelle. La carica elettrica è una proprietà intrinseca delle particelle fondamentali che costituiscono gli oggetti come le bacchette, la seta e la pelle. Ossia, la carica è una proprietà che si manifesta automaticamente con quelle particelle, ovunque esse esistano.

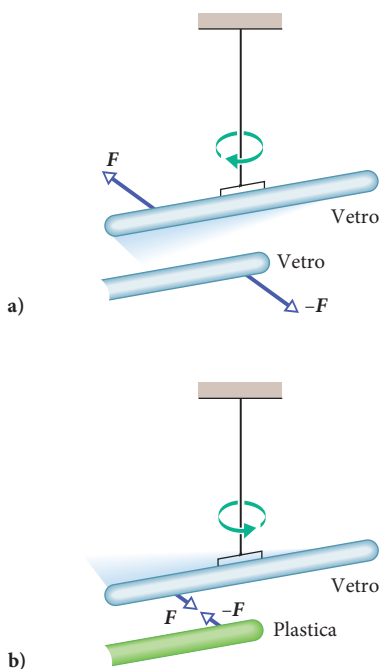
**Due tipi.** Esistono due tipi di carica elettrica, ai quali lo scienziato e statista statunitense Benjamin Franklin dette il nome di *carica positiva* e *carica negativa*. Avrebbe potuto chiamarle in qualunque altro modo (per esempio, ciliegia e noce), ma usare i segni algebrici come nomi torna utile quando sommiamo le cariche per trovare la carica complessiva. Nella maggior parte degli oggetti di uso quotidiano, come una tazza, c'è all'incirca lo stesso numero di particelle cariche positivamente e di particelle cariche negativamente, perciò la carica risultante è nulla: si dice che la carica è *bilanciata* e che l'oggetto è *eletticamente neutro* (o semplicemente *neutro*, per brevità).

**Eccesso di carica.** Normalmente voi siete neutri. Tuttavia, se vivete in regioni in cui l'umidità è bassa, sapete che la carica sul vostro corpo può diventare leggermente non equilibrata quando camminate su certi tappeti: o acquistate carica negativa dal tappeto (nei punti di contatto tra le scarpe e il tappeto) e diventate carichi negativamente, o perdetevi carica negativa e diventate carichi positivamente. In entrambi i casi la carica extra è detta *eccesso di carica*. Probabilmente non ve ne accorgete fino a che non vi avvicinate alla maniglia di una porta o a un'altra persona. Allora, se il vostro eccesso di carica è sufficiente, si genera una scintilla tra voi e l'altro oggetto, che elimina il vostro eccesso di carica. Questa scintilla può essere fastidiosa e perfino in qualche misura dolorosa. Questi processi di *carica* e *scarica* non avvengono in presenza di umidità, perché l'acqua presente nell'aria *neutralizza* il vostro eccesso di carica con una rapidità uguale a quella con la quale lo acquistate.

Due dei grandi misteri della fisica sono: 1) *perché* l'universo possiede particelle dotate di carica elettrica (di che cosa si tratta in realtà) e 2) *perché* la carica elettrica è di due tipi (e non, per esempio, di un solo tipo o di tre tipi)? Stiamo ancora lavorando per rispondere a queste domande. Ciò nonostante, con molti esperimenti simili a quelli descritti gli scienziati hanno scoperto che:



particelle con cariche elettriche dello stesso segno si respingono e particelle con cariche elettriche di segno opposto si attraggono.



**Figura 21.1** a) Le due bacchette di vetro sono state strofinate con un panno di seta e una di esse è stata appesa a un filo. Quando sono vicine l'una all'altra, le due bacchette si respingono. b) La bacchetta di plastica è stata strofinata con una pelle di camoscio. Quando viene avvicinata alla bacchetta di vetro, le due bacchette si attraggono.

A breve metteremo questa regola in forma quantitativa tramite la legge di Coulomb per la *forza elettrostatica* (o *forza elettrica*) tra particelle cariche. Il termine *elettrostatica* è usato per enfatizzare che le due cariche o sono ferme l'una rispetto all'altra o si muovono solo molto lentamente.

**Esperimenti.** Torniamo ora ai due esperimenti per capire come il moto della bacchetta non sia frutto di magie. Quando strofiniamo la bacchetta di vetro con un panno di seta, una piccola quantità di carica negativa passa dalla bacchetta alla seta (un trasferimento come quello tra voi e il tappeto), lasciando la bacchetta con un piccolo eccesso di carica positiva. (In quale verso si muovano le cariche negative non è ovvio e richiede molta sperimentazione.) *Strofiniamo* la seta sulla bacchetta per aumentare il numero di punti di contatto e di conseguenza la quantità di carica trasferita, per quanto piccola. Appendiamo la bacchetta tramite il filo per *isolarla elettricamente* dall'ambiente circostante (in modo che l'ambiente non possa neutralizzarla cedendole la quantità di carica negativa necessaria a bilanciare la sua carica). Quando strofiniamo la seconda bacchetta con il panno di seta, anche quest'ultima diventa carica positivamente. In questo modo, quando la avviciniamo alla prima bacchetta, le due bacchette si respingono (Figura 21.2a).

Successivamente, quando strofiniamo la bacchetta di plastica con una pelle di camoscio, la bacchetta acquista un eccesso di carica negativa dalla pelle. (Di nuovo, il verso del trasferimento si impara attraverso molti esperimenti.) Quando avviciniamo la bacchetta di plastica (con carica negativa) alla bacchetta di vetro appesa (con carica positiva), le bacchette si attraggono (Figura 21.2b). Tutto ciò è impercettibile. Non potete vedere né la carica né il suo trasferimento, vedete solo gli effetti di tale trasferimento.

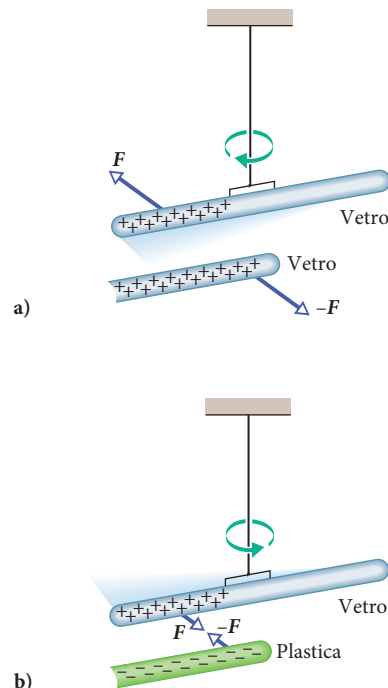
## Conduttori e isolanti

Possiamo classificare in generale i materiali in base alla capacità della carica di muoversi attraverso di essi. I **conduttori** sono materiali attraverso i quali le cariche si muovono abbastanza liberamente; per esempio, i metalli (come il rame dei fili elettrici), il corpo umano e l'acqua del rubinetto. I materiali **non conduttori**, anche detti **isolanti**, sono materiali nei quali le cariche non possono muoversi liberamente; per esempio, la gomma (come il rivestimento dei fili elettrici), la plastica, il vetro e l'acqua chimicamente pura. I **semiconduttori** sono materiali con comportamento intermedio tra i conduttori e gli isolanti, per esempio il silicio e il germanio usati nei chip dei computer. I **superconduttori** sono conduttori *perfetti*, che permettono alle cariche di muoversi senza *alcun* ostacolo. In questi capitoli trattiamo soltanto i conduttori e gli isolanti.

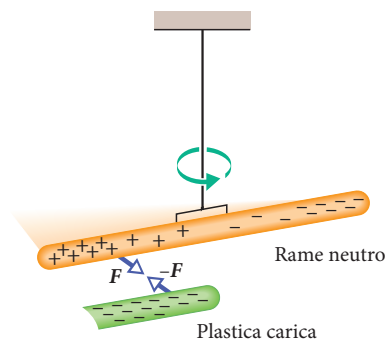
**Percorso conduttivo.** Ecco un esempio di come la conduzione può eliminare l'eccesso di carica di un oggetto. Se strofinate una bacchetta di rame con un panno di lana, una certa quantità di carica viene trasferita dalla lana al rame. Tuttavia, se tenete in mano la bacchetta mentre toccate anche un rubinetto connesso a una tubatura metallica, non riuscirete a caricare la bacchetta nonostante il trasferimento di carica. Il motivo è che voi, la bacchetta e il rubinetto siete tutti conduttori connessi, attraverso le tubature, alla superficie della Terra, che a sua volta è un enorme conduttore. Poiché le cariche in eccesso messe sulla bacchetta dalla lana si respingono, si allontanano l'una dall'altra muovendosi prima attraverso la bacchetta, poi attraverso di voi e infine attraverso il rubinetto e le tubature per raggiungere la superficie terrestre, dove si sparpagliano. Il processo lascia la bacchetta elettricamente neutra.

Nel realizzare così un percorso di conduttori tra un oggetto e la superficie terrestre si dice che *mettiamo a terra* l'oggetto, e nel neutralizzare l'oggetto (eliminando una carica positiva o negativa non bilanciata) si dice che *scarichiamo* l'oggetto. Se invece di tenere la bacchetta in mano la tenete per mezzo di un manico isolante, eliminate il percorso conduttivo verso la Terra e la bacchetta può essere caricata per strofinamento (la carica resta sulla bacchetta), purché non la tocchiate direttamente con le mani.

**Particelle cariche.** Le proprietà dei conduttori e degli isolanti sono dovute alla struttura e alla natura elettrica degli atomi. Gli atomi sono composti da *protoni* carichi positivamente, da *elettroni* carichi negativamente e da *neutroni*, elettricamente neutri. I protoni e i neutroni sono strettamente legati assieme in un *nucleo* centrale.



**Figura 21.2 a)** Due bacchette cariche con carica dello stesso segno si respingono. **b)** Due bacchette cariche con carica di segno opposto si attraggono. I segni «+» indicano una carica totale positiva e i segni «-» una carica totale negativa.



**Figura 21.3** Una bacchetta di rame neutra è elettricamente isolata dall'ambiente circostante essendo sospesa tramite un filo non conduttore. Ciascuna estremità della bacchetta di rame sarà attratta da una bacchetta carica. Nel caso illustrato, gli elettroni di conduzione della bacchetta di rame sono respinti verso l'estremità più lontana della bacchetta stessa dalla carica negativa della bacchetta di plastica. Poi la stessa carica negativa attrae la carica positiva rimasta sull'estremità vicina della bacchetta di rame in modo da avvicinare l'estremità prossima alla bacchetta di plastica.

La carica di un singolo elettrone e quella di un singolo protone hanno lo stesso valore assoluto, ma sono di segno opposto. Quindi, un atomo elettricamente neutro contiene un uguale numero di elettroni e di protoni. Gli elettroni sono tenuti vicini al nucleo perché hanno segno opposto rispetto ai protoni del nucleo e quindi sono attratti dal nucleo stesso. Se così non fosse, non esisterebbero gli atomi e di conseguenza nemmeno voi.

Quando gli atomi di un conduttore come il rame si aggregano per formare un solido, alcuni dei loro elettroni più esterni (e quindi più debolmente legati) diventano liberi di muoversi all'interno del solido, lasciando dietro di loro atomi carichi positivamente (*ioni positivi*). Questi elettroni mobili sono detti *elettroni di conduzione*. Ci sono pochi (a volte nessuno) elettroni liberi in un materiale non conduttore.

**Carica indotta.** L'esperimento della **Figura 21.3** mostra la mobilità della carica in un conduttore. Una bacchetta di plastica caricata negativamente attrarrà una qualunque delle due estremità di una bacchetta di rame neutra isolata. Ciò che accade è che i molti elettroni di conduzione nell'estremità più vicina della bacchetta di rame sono respinti dalla carica negativa sulla bacchetta di plastica. Alcuni degli elettroni di conduzione si muovono verso l'estremità lontana della bacchetta di rame, lasciando l'estremità vicina impoverita di elettroni e quindi con una carica positiva non bilanciata. Questa carica positiva è attratta verso la carica negativa della bacchetta di plastica. Sebbene la bacchetta di rame sia neutra, si dice che ha una *carica indotta*, ossia che alcune delle sue cariche positive e negative sono state separate per effetto della presenza di una carica vicina.

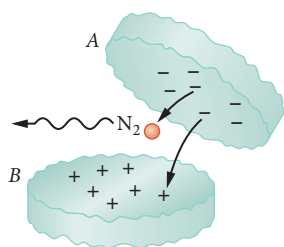
Analogamente, se una bacchetta di vetro caricata positivamente viene avvicinata a un'estremità di una bacchetta neutra di rame, si crea di nuovo una carica indotta nella bacchetta neutra di rame, ma in questo caso è l'estremità vicina che acquista elettroni di conduzione, diventa carica negativamente ed è attratta dalla bacchetta di vetro, mentre l'estremità lontana viene caricata positivamente.

Notate che solo gli elettroni di conduzione, con le loro cariche negative, possono muoversi; gli ioni positivi sono fissi nelle loro posizioni. Quindi, un oggetto si carica positivamente soltanto attraverso la *rimozione di cariche negative*.

### Lampi azzurri sprigionati da una mentina

Una prova indiretta dell'attrazione tra cariche di segno opposto si ha quando si mastica una mentina a forma di salvagente. Se adattate gli occhi all'oscurità per circa 15 minuti e avete un amico che mastica una di quelle caramelle, vedrete un debole lampo di luce blu uscire dalla sua bocca a ogni masticazione. Ogni volta che un morso rompe un cristallo di zucchero in pezzi, con tutta probabilità ciascun pezzo finirà per avere un numero di elettroni diverso dall'altro. Supponete che un cristallo si spezzi nelle parti *A* e *B* e che *A* abbia più elettroni sulla sua superficie rispetto a *B* (**Figura 21.4**). Ciò significa che *B* ha ioni positivi (atomi che hanno perso elettroni a favore di *A*) sulla propria superficie. Poiché gli elettroni su *A* sono fortemente attratti dagli ioni positivi di *B*, alcuni di quegli elettroni saltano da un frammento all'altro.

Mentre i frammenti *A* e *B* si allontanano l'uno dall'altro, l'aria (per lo più costituita da azoto,  $N_2$ ) fluisce nello spazio tra i frammenti, e molti degli elettroni che saltano da un frammento all'altro collidono con le molecole d'azoto presenti nell'aria, provocando l'emissione di luce ultravioletta dalle molecole. Non potete vedere questo tipo di luce. Tuttavia, le molecole sulle superfici dei frammenti di mentina assorbono la radiazione ultravioletta ed emettono una luce blu che potete vedere: è la luce blu che esce dalla bocca del vostro amico.



**Figura 21.4** Due frammenti di una mentina quando si separano l'uno dall'altro. Gli elettroni che saltano dalla superficie negativa del frammento *A* a quella positiva del frammento *B* urtano le molecole di azoto ( $N_2$ ) dell'aria.

## Legge di Coulomb

Veniamo ora all'equazione che esprime la legge di Coulomb, ma prima teniamo presente un avvertimento. Questa equazione è valida solo per le particelle cariche (e per poche altre cose che possono essere trattate come particelle). Per i corpi estesi, nei quali la carica è localizzata in molti punti diversi, occorrono tecniche potenti. Dunque, qui consideriamo solo particelle cariche e non, per esempio, due gatti carichi.

Se due particelle cariche vengono avvicinate l'una all'altra, ciascuna di esse esercita sull'altra una **forza elettrostatica**. La forza è diretta lungo la retta che congiunge le due cariche e il verso dei vettori delle forze dipende dai segni delle cariche. Se le particelle hanno lo stesso segno, le cariche si respingono. Questo vuol dire che il verso del vettore della forza esercitata su ciascuna particella è tale

da allontanarla dall'altra particella (Figura 21.5a e 21.5b). Se rilasciamo le particelle, queste accelerano allontanandosi l'una dall'altra. Se, invece, le particelle hanno cariche di segno opposto, si attraggono. Questo vuol dire che il verso del vettore della forza esercitata su ciascuna particella è tale da avvicinarla all'altra particella (Figura 21.5c). Se rilasciamo le particelle, queste accelerano l'una verso l'altra.

L'equazione per le forze elettrostatiche che agiscono sulle particelle è detta **legge di Coulomb** e prende il nome da Charles-Augustin de Coulomb, che la ricavò tramite gli esperimenti da lui condotti nel 1785. Scriviamo l'equazione in forma vettoriale e in termini delle particelle mostrate nella Figura 21.6, dove la particella 1 ha carica  $q_1$  e la particella 2 ha carica  $q_2$ . (Questi simboli possono rappresentare cariche sia positive sia negative.) Concentriamoci sulla particella 1 e scriviamo la forza agente su di essa in termini di un versore  $\hat{r}$  diretto lungo un asse radiale che attraversa le due particelle nel verso uscente dalla particella 2. (Come per gli altri versori,  $\hat{r}$  ha modulo 1 e non ha unità di misura; il suo scopo è quello di indicare un'orientazione nello spazio, come una freccia che indica la direzione su un cartello stradale.) Detto ciò, scriviamo l'equazione della forza elettrostatica nella forma

$$\mathbf{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \hat{r} \quad (\text{legge di Coulomb}) \quad (21.1)$$

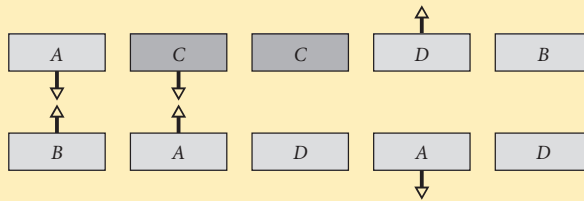
dove  $r$  è la distanza tra le particelle e  $k$  è una costante positiva detta *costante elettrostatica* o *costante di Coulomb*. (Parleremo di  $k$  più avanti.)

Controlliamo per prima cosa il verso della forza che agisce sulla particella 1, come risulta dall'equazione 21.1. Se  $q_1$  e  $q_2$  hanno lo stesso segno, il prodotto  $q_1 q_2$  dà un risultato positivo. Quindi, l'equazione 21.1 ci dice che la forza agente sulla particella 1 ha lo stesso verso di  $\hat{r}$ . Ciò è corretto, perché la particella 1 è respinta dalla particella 2. Ora, se  $q_1$  e  $q_2$  hanno segni opposti, il prodotto  $q_1 q_2$  dà un risultato negativo. Quindi, l'equazione 21.1 ci dice che la forza agente sulla particella 1 ha verso opposto a  $\hat{r}$ . Ciò è corretto perché la particella 1 è attratta verso la particella 2.

### ✓ VERIFICA 1

La figura mostra cinque coppie di targhette. A, B e D sono targhette di plastica cariche, mentre C è una targhetta di rame elettricamente neutra.

Le forze elettrostatiche tra le coppie di targhette sono mostrate per tre delle coppie. Per le due coppie rimanenti, le targhette si respingono o si attraggono?



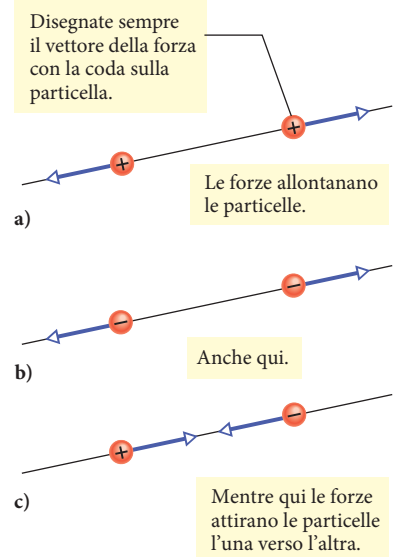
**Una digressione.** Ecco qualcosa di molto curioso. La forma dell'equazione 21.1 è uguale a quella dell'equazione di Newton per la forza gravitazionale (equazione 13.3) esercitata tra due particelle di masse  $m_1$  e  $m_2$  poste a una distanza  $r$ :

$$\mathbf{F} = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \hat{r} \quad (\text{legge di Newton}) \quad (21.2)$$

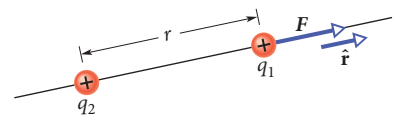
dove  $G$  è la costante gravitazionale. Sebbene i due tipi di forze siano alquanto diversi, entrambe le equazioni seguono la legge dell'inverso del quadrato (dipendenza da  $1/r^2$ ), che coinvolge il prodotto di una grandezza caratteristica delle particelle interagenti: la carica in un caso e la massa nell'altro. Le due leggi, però, si differenziano in quanto le forze gravitazionali sono sempre attrattive, mentre le forze elettrostatiche possono essere o attrattive o repulsive, a seconda dei segni delle cariche. Questa differenza origina dal fatto che esiste un solo tipo di massa mentre esistono due tipi di carica.

**Unità di misura.** L'unità di misura della carica nel SI è il **coulomb** (C). Per praticità, avendo a che fare con misure molto accurate, il coulomb è derivato dall'*ampere*, l'unità del SI per l'intensità della corrente elettrica  $i$ . Tratteremo in dettaglio la corrente nel capitolo 26, ma qui notiamo soltanto che l'intensità della corrente elettrica  $i$  è la rapidità  $dq/dt$  con la quale la carica passa attraverso un punto o una regione:

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (\text{intensità della corrente elettrica}) \quad (21.3)$$



**Figura 21.5** Due particelle cariche si respingono se hanno cariche dello stesso segno: **a)** entrambe positive o **b)** entrambe negative. **c)** Si attraggono se hanno cariche di segni opposti.



**Figura 21.6** La forza elettrostatica che agisce sulla particella 1 può essere descritta in termini di un versore  $\hat{r}$  diretto lungo un asse radiale che attraversa le due particelle ed è orientato nel verso uscente dalla particella 2.

Riformulando l'equazione 21.3 e sostituendo i simboli con le rispettive unità di misura (coulomb C, ampere A e secondi s), vediamo che

$$1 \text{ C} = (1 \text{ A})(1 \text{ s})$$

**Modulo della forza.** Per ragioni storiche (e perché così facendo si semplificano molte altre formule), la costante elettrostatica  $k$  dell'equazione 21.1 è spesso espressa come  $1/(4\pi\epsilon_0)$ . Pertanto, il modulo della forza elettrostatica data dalla legge di Coulomb diventa

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{r^2} \quad (\text{legge di Coulomb}) \quad (21.4)$$

Le costanti che compaiono nell'equazione 21.1 e 21.4 hanno il valore

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8,99 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2 \quad (21.5)$$

La quantità  $\epsilon_0$ , chiamata **costante dielettrica del vuoto**, talvolta compare separatamente nelle equazioni e ha il valore

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2) \quad (21.6)$$

**Risolvere un problema.** Notate che nell'equazione 21.4, che dà il modulo della forza, compaiono i valori assoluti delle cariche. Perciò, nel risolvere i problemi di questo capitolo usiamo l'equazione 21.4 per trovare il modulo di una forza che agisce su una particella per effetto di una seconda particella, e determiniamo separatamente la direzione e il verso della forza considerando i segni delle cariche delle due particelle.

**Forze multiple.** Come per tutte le forze di questo libro, anche la forza elettrostatica obbedisce al principio di sovrapposizione. Supponiamo di avere  $n$  particelle cariche nelle vicinanze di una data particella indicata con 1; la forza risultante che agisce sulla particella 1 è data dalla somma vettoriale

$$\mathbf{F}_{1,\text{tot}} = \mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_{13} + \mathbf{F}_{14} + \mathbf{F}_{15} + \dots + \mathbf{F}_{1n} \quad (21.7)$$

dove, per esempio,  $\mathbf{F}_{14}$  è la forza che agisce sulla particella 1 per effetto della particella 4.

Questa equazione è la chiave per risolvere molti dei problemi proposti, allora enunciamola anche a parole. Se volete conoscere la forza risultante che agisce su una determinata particella carica circondata da altre particelle cariche, prima individuate in modo chiaro la particella d'interesse e poi trovate la forza esercitata su di essa da ciascuna delle altre particelle. Disegnate i vettori di queste forze su un diagramma di corpo libero per la particella scelta, ossia con la coda sulla particella stessa. (Questo può sembrare banale, ma non farlo porta facilmente a errori.) Poi sommate tutte queste forze *come vettori*, in base alle regole date nel capitolo 3, e non come scalari. (Non potete banalmente sommare i loro moduli.) Il risultato è la forza risultante che agisce sulla particella scelta.

Sebbene la natura vettoriale delle forze renda la risoluzione dei problemi più ardua rispetto al caso in cui si hanno semplicemente degli scalari, siate grati che l'equazione 21.7 funziona. Se due vettori forza non si sommassero in modo semplice, ma per qualche ragione si aumentassero a vicenda, il mondo sarebbe molto difficile da capire e da gestire.

**Teoremi del guscio.** In analogia con i teoremi del guscio per la forza gravitazionale (paragrafo 13.1), si hanno due teoremi del guscio per la forza elettrostatica.



Primo teorema del guscio. Una particella carica posta all'esterno di un guscio sferico che ha una carica uniformemente distribuita sulla sua superficie è attratta o respinta come se la carica del guscio fosse concentrata in una particella posta nel suo centro.



Secondo teorema del guscio. Una particella carica posta all'interno di un guscio sferico che ha una carica uniformemente distribuita sulla sua superficie non risente di alcuna forza dovuta al guscio.

(Nel primo teorema supponiamo che la carica presente sul guscio sia molto maggiore della carica della particella. In questo modo la presenza della particella ha un effetto trascurabile sulla distribuzione della carica sul guscio.)



## Conduttori sferici

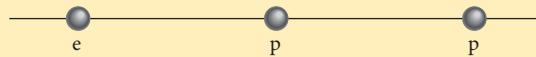
Se un eccesso di carica viene posto su un guscio sferico composto di materiale conduttore, la carica in eccesso si distribuisce uniformemente sulla superficie (esterna). Per esempio, se poniamo degli elettroni in eccesso su un guscio sferico metallico, questi elettroni si respingono e tendono ad allontanarsi, distribuendosi sulla superficie disponibile fino ad essere uniformemente distribuiti. Questa disposizione rende massime le distanze tra tutte le coppie di elettroni in eccesso. Secondo il primo teorema del guscio sferico, il guscio attirerà o respingerà una carica esterna come se tutto l'eccesso di carica presente sul guscio fosse concentrato al centro del guscio stesso.

Se togliamo della carica negativa da un guscio sferico metallico, anche la carica positiva del guscio che ne risulta si distribuisce uniformemente sulla superficie del guscio. Per esempio, se togliamo  $n$  elettroni, ci sono  $n$  postazioni di carica positiva (postazioni che hanno perso un elettrone) che sono distribuite uniformemente sulla superficie del guscio. Secondo il primo teorema del guscio sferico, il guscio attirerà o respingerà una carica esterna come se tutto l'eccesso di carica presente sul guscio fosse concentrato al centro del guscio stesso.



### VERIFICA 2

La figura mostra due protoni (indicati dal simbolo p) e un elettrone (indicato dal simbolo e) posti su un asse. Sul protone centrale, quali sono la direzione e il verso (a) della forza dovuta all'elettrone, (b) della forza dovuta all'altro protone e (c) della forza risultante?



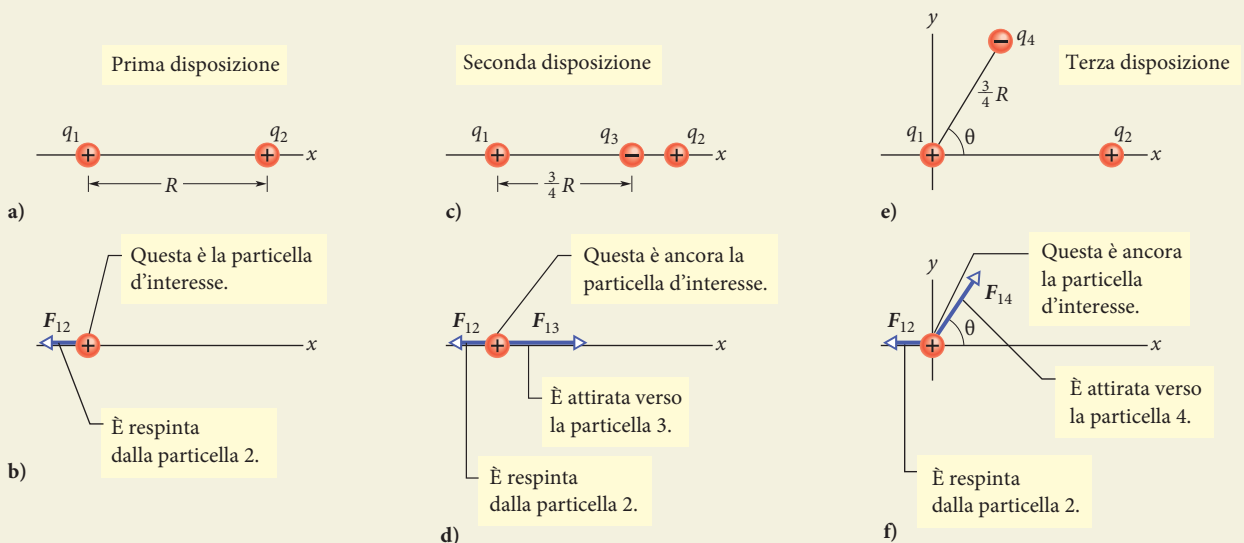
### Problema svolto 21.1 Trovare la forza risultante dovuta alle altre due particelle

Questo problema svolto contiene di fatto tre esempi di difficoltà crescente, da un livello base a un livello più difficile. In tutti abbiamo la stessa particella carica 1. Prima c'è una sola forza che agisce su di essa (livello base). Poi ci sono due forze, ma queste agiscono lungo la stessa direzione e in versi opposti (non troppo difficile). Poi ci sono di nuovo due forze, ma queste agiscono in direzioni molto diverse (qui dobbiamo tenere seriamente in considerazione il fatto che sono vettori). Il punto chiave per tutti e tre gli esempi è disegnare correttamente le forze *prima* che prendiate la calcolatrice, altrimenti è possibile che calcoliate cose senza senso.

(a) La **Figura 21.7a** mostra due particelle cariche positivamente fisse nelle loro posizioni su un asse  $x$ . Le cariche sono  $q_1 = 1,60 \cdot 10^{-19}$  C e  $q_2 = 3,20 \cdot 10^{-19}$  C, e la distanza tra le particelle è  $R = 0,0200$  m. Quali sono il modulo, la direzione e il verso della forza elettrostatica  $F_{12}$  esercitata sulla particella 1 dalla particella 2?

#### SOLUZIONE (a)

Poiché entrambe le particelle sono cariche positivamente, la particella 1 è respinta dalla particella 2 con una forza il cui modulo è dato dall'equazione 21.4. Dunque, il verso della for-



**Figura 21.7** a) Due particelle con cariche  $q_1$  e  $q_2$  sono fisse nelle loro posizioni su un asse  $x$ . b) Il diagramma di corpo libero per la particella 1, che mostra la forza elettrostatica esercitata su di essa dalla particella 2. c) Viene inserita la particella 3. d) Il diagramma di corpo libero per la particella 1. e) Viene inserita la particella 4. f) Il diagramma di corpo libero per la particella 1.

za  $F_{12}$  agente sulla particella 1 è uscente dalla particella 2, quindi nel verso negativo dell'asse  $x$ , come indicato nel diagramma di corpo libero della **Figura 21.7b**.

**Due particelle.** Usando l'equazione 21.4 con la distanza  $R$  al posto di  $r$ , possiamo scrivere il modulo  $F_{12}$  di questa forza come

$$\begin{aligned} F_{12} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{R^2} \\ &= (8,99 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \cdot \frac{(1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C})(3,20 \cdot 10^{-19} \text{ C})}{(0,0200 \text{ m})^2} \\ &= 1,15 \cdot 10^{-24} \text{ N} \end{aligned}$$

Quindi, la forza  $F_{12}$  ha modulo e angolo (rispetto al semiasse positivo delle  $x$ ) dati da

$$1,15 \cdot 10^{-24} \text{ N} \quad \text{e} \quad 180^\circ$$

Possiamo anche scrivere  $F_{12}$  nella notazione con i versori come

$$\mathbf{F}_{12} = -(1,15 \cdot 10^{-24} \text{ N})\mathbf{i}$$

(b) La **Figura 21.7c** è identica alla **Figura 21.7a**, salvo l'aggiunta della particella 3 sull'asse  $x$  tra la particella 1 e la particella 2. La particella 3 ha carica  $q_3 = -3,20 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  e si trova a una distanza pari a  $\frac{3}{4}R$  dalla particella 1. Qual è la forza elettrostatica risultante  $F_{1,\text{tot}}$  sulla particella 1 dovuta alle particelle 2 e 3?

### SOLUZIONE (b)

La presenza della particella 3 non altera la forza elettrostatica sulla particella 1 dovuta alla particella 2. Quindi, la forza  $F_{12}$  agisce ancora sulla particella 1. Analogamente, la forza  $F_{13}$  esercitata dalla particella 3 sulla particella 1 non è influenzata dalla presenza della particella 2. Poiché le particelle 1 e 3 hanno cariche di segno opposto, la particella 1 è attratta dalla particella 3. Pertanto, la forza  $F_{13}$  è diretta verso la particella 3, come indicato nel diagramma di corpo libero della **Figura 21.7d**.

**Tre particelle.** Per trovare il modulo di  $F_{13}$  possiamo riscrivere l'equazione 21.4 come

$$\begin{aligned} F_{13} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_3|}{\left(\frac{3}{4}R\right)^2} \\ &= (8,99 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \cdot \frac{(1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C})(3,20 \cdot 10^{-19} \text{ C})}{\left(\frac{3}{4}\right)^2 (0,0200 \text{ m})^2} \\ &= 2,05 \cdot 10^{-24} \text{ N} \end{aligned}$$

Possiamo anche scrivere  $F_{13}$  nella notazione con i versori:

$$\mathbf{F}_{13} = (2,05 \cdot 10^{-24} \text{ N})\mathbf{i}$$

La forza risultante  $F_{1,\text{tot}}$  sulla particella 1 è il vettore somma di  $F_{12}$  e  $F_{13}$ ; ossia, dall'equazione 21.7, possiamo scrivere la forza risultante  $F_{1,\text{tot}}$  sulla particella 1 nella notazione con i versori come

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{1,\text{tot}} &= \mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_{13} \\ &= -(1,15 \cdot 10^{-24} \text{ N})\mathbf{i} + (2,05 \cdot 10^{-24} \text{ N})\mathbf{i} = (9,00 \cdot 10^{-25} \text{ N})\mathbf{i} \end{aligned}$$

Quindi,  $F_{1,\text{tot}}$  ha modulo e angolo (rispetto al semiasse positivo delle  $x$ ) dati da

$$9,00 \cdot 10^{-25} \text{ N} \quad \text{e} \quad 0^\circ$$

(c) La **Figura 21.7e** è identica alla **Figura 21.7a**, salvo per l'aggiunta della particella 4. Questa ha carica  $q_4 = -3,20 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ , è posta a una distanza pari a  $\frac{3}{4}R$  dalla particella 1 lungo una retta che forma un angolo  $\theta = 60^\circ$  con l'asse  $x$ . Qual è la forza risultante  $F_{1,\text{tot}}$  sulla particella 1 dovuta alle particelle 2 e 4?

### SOLUZIONE (c)

La forza risultante  $F_{1,\text{tot}}$  è il vettore somma di  $F_{12}$  e di una nuova forza  $F_{14}$  che agisce sulla particella 1 ed è dovuta alla particella 4. Poiché le particelle 1 e 4 hanno cariche di segno opposto, la particella 1 è attratta dalla particella 4. Perciò, la forza  $F_{14}$  sulla particella 1 è diretta verso la particella 4 e forma un angolo  $\theta = 60^\circ$ , come indicato nel diagramma di corpo libero della **Figura 21.7f**.

**Quattro particelle.** Possiamo riscrivere l'equazione 21.4 come

$$\begin{aligned} F_{14} &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_4|}{\left(\frac{3}{4}R\right)^2} \\ &= (8,99 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \cdot \frac{(1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C})(3,20 \cdot 10^{-19} \text{ C})}{\left(\frac{3}{4}\right)^2 (0,0200 \text{ m})^2} \\ &= 2,05 \cdot 10^{-24} \text{ N} \end{aligned}$$

Allora, dall'equazione 21.7 possiamo scrivere la forza risultante  $F_{1,\text{tot}}$  che agisce sulla particella 1:

$$\mathbf{F}_{1,\text{tot}} = \mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_{14}$$

Poiché le forze  $F_{12}$  e  $F_{14}$  non sono dirette lungo lo stesso asse, non possiamo sommarle semplicemente combinando i loro moduli. Dobbiamo piuttosto sommarle come vettori, usando uno dei seguenti metodi.

**Metodo 1.** Sommare direttamente con una calcolatrice che esegue calcoli vettoriali. Per  $F_{12}$  inseriamo il modulo  $1,15 \cdot 10^{-24}$  e l'angolo  $180^\circ$ . Per  $F_{14}$  inseriamo il modulo  $2,05 \cdot 10^{-24}$  e l'angolo  $60^\circ$ . Poi sommiamo i vettori.

**Metodo 2.** Sommare nella notazione con i versori. Prima riscriviamo  $F_{14}$  come

$$\mathbf{F}_{14} = (F_{14} \cos \theta)\mathbf{i} + (F_{14} \sin \theta)\mathbf{j}$$

Sostituendo  $2,05 \cdot 10^{-24} \text{ N}$  al posto di  $F_{14}$  e  $60^\circ$  al posto di  $\theta$ , l'equazione precedente diventa

$$\mathbf{F}_{14} = (1,025 \cdot 10^{-24} \text{ N})\mathbf{i} + (1,775 \cdot 10^{-24} \text{ N})\mathbf{j}$$

Quindi sommiamo:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_{1,\text{tot}} &= \mathbf{F}_{12} + \mathbf{F}_{14} \\ &= -(1,15 \cdot 10^{-24} \text{ N})\mathbf{i} \\ &\quad + (1,025 \cdot 10^{-24} \text{ N})\mathbf{i} + (1,775 \cdot 10^{-24} \text{ N})\mathbf{j} \\ &\approx (-1,25 \cdot 10^{-25} \text{ N})\mathbf{i} + (1,78 \cdot 10^{-24} \text{ N})\mathbf{j} \end{aligned}$$

**Metodo 3.** Sommare le componenti asse per asse. La somma delle componenti  $x$  dà

$$\begin{aligned} F_{1,\text{tot},x} &= F_{12,x} + F_{14,x} = F_{12} + F_{14} \cos 60^\circ \\ &= -1,15 \cdot 10^{-24} \text{ N} + (2,05 \cdot 10^{-24} \text{ N})(\cos 60^\circ) \\ &= -1,25 \cdot 10^{-25} \text{ N} \end{aligned}$$

La somma delle componenti  $y$  dà

$$\begin{aligned} F_{1,\text{tot},y} &= F_{12,y} + F_{14,y} = 0 + F_{14} \sin 60^\circ \\ &= (2,05 \cdot 10^{-24} \text{ N})(\sin 60^\circ) = 1,78 \cdot 10^{-24} \text{ N} \end{aligned}$$

La forza risultante  $F_{1,\text{tot}}$  ha modulo

$$F_{1,\text{tot}} = \sqrt{F_{1,\text{tot},x}^2 + F_{1,\text{tot},y}^2} = 1,78 \cdot 10^{-24} \text{ N}$$

Per trovare la direzione e il verso di  $F_{1,\text{tot}}$  prendiamo

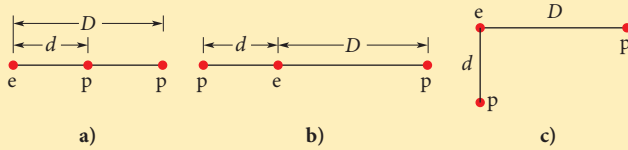
$$\theta = \tan^{-1} \frac{F_{1,\text{tot},y}}{F_{1,\text{tot},x}} = -86,0^\circ$$

Tuttavia, questo è un risultato irragionevole, perché  $F_{1,\text{tot}}$  deve avere una direzione compresa tra quella di  $F_{12}$  e quella di  $F_{14}$ . Per correggere  $\theta$  aggiungiamo  $180^\circ$ , ottenendo così

$$-86,0^\circ + 180^\circ = 94,0^\circ$$

### VERIFICA 3

La figura mostra tre disposizioni di un elettrone «e» e due protoni «p». (a) Mettete i tre casi in ordine decrescente del modulo della forza elettrostatica risultante esercitata sull'elettrone per effetto dei due protoni. (b) Nel caso c) l'angolo compreso tra la forza risultante agente sull'elettrone e il segmento  $d$  è maggiore o minore di  $45^\circ$ ?



### Problema svolto 21.2 Bilanciamento di due forze che agiscono su una particella

La **Figura 21.8a** mostra due particelle fisse: una particella di carica  $q_1 = +8q$  nell'origine dell'asse  $x$  e una particella di carica  $q_2 = -2q$  in  $x = L$ . In quale punto (che non sia infinitamente lontano) si può collocare un protone in modo che resti in *equilibrio* (ossia, sottoposto a una forza risultante nulla)? Si tratta di un equilibrio *stabile* o *instabile*? (Vale a dire, se il protone viene spostato, le forze tendono a riportarlo verso il punto di equilibrio o lo allontanano da esso?)

#### SOLUZIONE

Se  $F_1$  è la forza esercitata sul protone dalla carica  $q_1$  e  $F_2$  la forza esercitata sul protone dalla carica  $q_2$ , il punto che cerchiamo è quello in cui  $F_1 + F_2 = 0$ . Pertanto,

$$F_1 = -F_2 \quad (21.8)$$

Questo ci dice che nel punto cercato le forze esercitate sul protone dalle altre due particelle devono avere modulo uguale,

$$F_1 = F_2 \quad (21.9)$$

e che le forze devono avere la stessa direzione, ma versi opposti.

**Ragionamento.** Poiché il protone ha carica positiva, il protone e la particella con carica  $q_1$  hanno cariche dello stesso segno e la forza  $F_1$  che agisce sul protone deve puntare nel verso di allontanamento da  $q_1$ . Inoltre, il protone e la particella di carica  $q_2$  hanno segno opposto, allora la forza  $F_2$  che agisce sul protone deve puntare nel verso di avvicinamento a  $q_2$ . «Verso di allontanamento da  $q_1$ » e «verso di avvicinamento a  $q_2$ » possono essere versi opposti solo se il protone è posto sull'asse  $x$ .

Se il protone è sull'asse  $x$  in un qualunque punto tra  $q_1$  e  $q_2$ , come il punto  $P$  della **Figura 21.8b**,  $F_1$  e  $F_2$  hanno la stessa direzione e lo stesso verso e non versi opposti come richiesto. Se il protone è sull'asse  $x$  in un qualunque punto alla sinistra di  $q_1$ , come il punto  $S$  della **Figura 21.8c**,  $F_1$  e  $F_2$  hanno versi opposti. Tuttavia, l'equazione 21.4 ci dice che in questo caso  $F_1$  e  $F_2$  non possono avere modulo uguale:  $F_1$  deve essere

maggiore di  $F_2$ , perché  $F_1$  è generata da una carica più vicina (con  $r$  minore) di valore assoluto più grande ( $8q$  invece di  $2q$ ).

Infine, se il protone è in un qualunque punto alla destra di  $q_2$ , come il punto  $R$  della **Figura 21.8d**,  $F_1$  e  $F_2$  hanno di nuovo versi opposti. Tuttavia, poiché ora la carica di valore assoluto maggiore ( $q_1$ ) è più lontana dal protone della carica di valore assoluto minore, esiste un punto in cui  $F_1$  è uguale a  $F_2$ . Chiamiamo  $x$  la coordinata di questo punto e  $q_p$  la carica del protone.

**Calcoli.** Tramite l'equazione 21.4 possiamo ora riscrivere l'equazione 21.9:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{8qq_p}{x^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2qq_p}{(x-L)^2} \quad (21.10)$$

(Notate che nell'equazione 21.10 compaiono solo i valori assoluti delle cariche. Abbiamo già stabilito le direzioni e i versi delle forze nel diagramma della **Figura 21.8** e non vogliamo includere qui alcun segno positivo o negativo.) Rielaborando l'equazione 21.10, otteniamo

$$\left(\frac{x-L}{x}\right)^2 = \frac{1}{4}$$

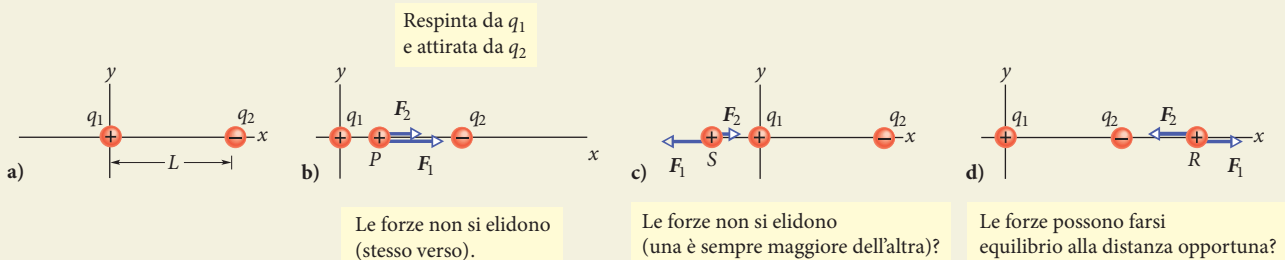
Estraendo le radici quadrate di entrambi i membri, troviamo

$$\frac{x-L}{x} = \frac{1}{2}$$

e

$$x = 2L$$

L'equilibrio in  $x = 2L$  è instabile; ossia, se il protone viene spostato verso sinistra rispetto al punto  $R$ , sia  $F_1$  sia  $F_2$  aumentano, ma  $F_2$  aumenta di più (perché  $q_2$  è più vicina di  $q_1$ ) e una forza risultante tenderà a spostare il protone ancora più verso sinistra. Se il protone viene spostato verso destra, sia  $F_1$  sia  $F_2$  diminuiscono, ma  $F_2$  diminuisce di più e una forza risultante tenderà a spostare il protone ancora più verso destra. Nel caso di equilibrio stabile, il protone spostato leggermente dalla posizione di equilibrio tende a tornarci.



**Figura 21.8 a)** Due particelle di cariche  $q_1$  e  $q_2$  sono fisse su un asse  $x$  a una distanza  $L$  l'una dall'altra. **b)-d)** Tre possibili posizioni  $P$ ,  $S$  e  $R$  di un protone. In ciascuna posizione  $F_1$  è la forza esercitata sul protone dalla particella 1 e  $F_2$  è la forza esercitata sul protone dalla particella 2.

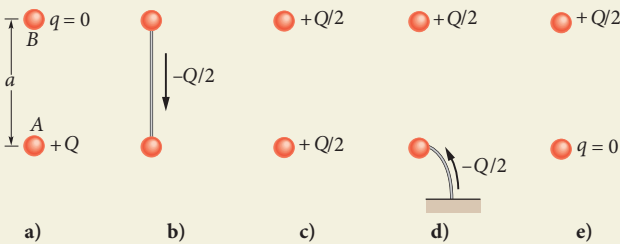
### Problema svolto 21.3 Carica condivisa da due sfere conduttrici identiche

Nella **Figura 21.9a** due sfere conduttrici identiche ed elettricamente isolate  $A$  e  $B$  sono separate da una distanza  $a$  (tra i due centri) che è grande rispetto alle loro dimensioni. La sfera  $A$  ha una carica positiva  $+Q$  e la sfera  $B$  è elettricamente neutra. Inizialmente non c'è alcuna forza elettrostatica tra le sfere. (L'ampia distanza garantisce che non si abbiano cariche indotte.)

(a) Supponete che le sfere siano collegate per un istante tramite un filo conduttore. Il filo è sottile abbastanza da far sì che qualunque carica risultante su di esso sia trascurabile. Qual è la forza elettrostatica tra le sfere dopo che il filo viene rimosso?

#### SOLUZIONE (a)

(1) Poiché le sfere sono identiche, collegarle significa che finiscono per avere cariche identiche (stesso segno e stesso valore). (2) La somma iniziale delle cariche (tenendo conto dei loro segni) deve essere uguale alla somma finale delle cariche.



**Figura 21.9** Due piccole sfere conduttrici  $A$  e  $B$ . **a)** Per iniziare la sfera  $A$  è carica positivamente. **b)** Una carica negativa viene trasferita da  $B$  ad  $A$  tramite un filo che le collega. **c)** Entrambe le sfere sono poi caricate positivamente. **d)** La carica negativa viene trasferita attraverso un filo per la messa a terra alla sfera  $A$ . **e)** La sfera  $A$  è quindi neutra.

**Ragionamento.** Quando le sfere sono collegate tramite il filo, gli elettroni (negativi) di conduzione di  $B$ , che si respingono a vicenda, hanno modo di allontanarsi gli uni dagli altri (lungo il filo verso la sfera  $A$ , carica positivamente, **Figura 21.9b**). Nel perdere carica negativa,  $B$  diventa carica positivamente. Nell'acquistare carica negativa,  $A$  diventa *meno* carica positivamente. Il trasferimento di carica si arresta quando la carica di  $B$  è aumentata fino a  $+Q/2$  e la carica di  $A$  è diminuita fino a  $+Q/2$ , il che avviene quando una carica  $-Q/2$  è passata da  $B$  ad  $A$ .

Dopo aver rimosso il filo (**Figura 21.9c**), possiamo supporre che la carica su una delle sfere non disturbi l'uniformità della distribuzione della carica sull'altra, perché le sfere sono piccole rispetto alla loro distanza. Possiamo quindi applicare a ciascuna sfera il primo teorema del guscio. Tramite l'equazione 21.4, con  $q_1 = q_2 = Q/2$  e  $r = a$ , si ha

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{(Q/2)(Q/2)}{a^2} = \frac{1}{16\pi\epsilon_0} \left(\frac{Q}{a}\right)^2$$

Le sfere, che ora sono cariche positivamente, si respingono.

(b) Ora supponete che la sfera  $A$  sia messa a terra momentaneamente e che poi la messa a terra sia rimossa. Qual è ora la forza elettrostatica tra le sfere?

#### SOLUZIONE (b)

**Ragionamento.** Quando forniamo un percorso conduttivo tra un oggetto carico e la terra (che è un enorme conduttore), neutralizziamo il corpo. Se la sfera  $A$  fosse carica negativamente, la repulsione reciproca tra gli elettroni in eccesso li farebbe muovere dalla sfera a terra. Tuttavia, poiché la sfera è carica positivamente, un numero di elettroni con carica complessiva  $-Q/2$  si sposta da terra alla sfera (**Figura 21.9d**), lasciando la sfera con carica nulla (**Figura 21.9e**). Pertanto, la forza elettrostatica è di nuovo zero.

## 21.2 LA CARICA È QUANTIZZATA

### Idee chiave

- La carica elettrica è quantizzata (cioè può assumere solo determinati valori).
- La carica di una particella può essere scritta come  $ne$ , dove  $n$  è un numero intero positivo o negativo ed  $e$  è la carica elementare, ossia il valore assoluto della carica dell'elettrone e del protone ( $\approx 1,602 \cdot 10^{-19}$  C).

### La carica è quantizzata

Ai tempi di Benjamin Franklin la carica elettrica era pensata come un fluido continuo, una rappresentazione che è stata utile per molti scopi. Tuttavia, oggi sappiamo che gli stessi fluidi come l'aria o l'acqua non sono continui, ma sono costituiti da atomi e molecole; la materia è discreta. Gli esperimenti mostrano che anche il «fluido» elettrico non è continuo, ma è costituito da multipli di una certa carica elementare. Una qualunque carica  $q$  positiva o negativa che possa essere osservata e misurata può essere scritta come

$$q = ne, \quad n = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (21.11)$$

in cui  $e$ , la **carica elementare**, ha il valore approssimato

$$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \quad (21.12)$$

L'elettrone ha una carica  $-e$  e il protone ha una carica  $+e$  (**Tabella 21.1**). Il neutrone è elettricamente neutro senza alcuna carica. Queste tre particelle sono le sole particelle del vostro corpo e di qualunque materiale comune. L'elettrone non è

**Tabella 21.1** Le cariche di tre particelle e delle loro antiparticelle.

Particella	Simbolo	Carica	Antiparticella	Simbolo	Carica
Elettrone	e oppure $e^-$	$-e$	Positrone	$e^+$	$+e$
Protone	p	$+e$	Antiprotone	$\bar{p}$	$-e$
Neutrone	n	0	Antineutrone	$\bar{n}$	0

**Tabella 21.2** Le cariche di tre quark e delle loro antiparticelle.

Quark	Simbolo	Carica	Antiparticella	Simbolo	Carica
Up	u	$+\frac{2}{3}e$	Antiquark up	$\bar{u}$	$-\frac{2}{3}e$
Down	d	$-\frac{1}{3}e$	Antiquark down	$\bar{d}$	$+\frac{1}{3}e$

formato a sua volta da altre particelle, mentre il protone e il neutrone sono formati da tre quark (Tabella 21.2). Alcune particelle non comuni sono formate da un quark e un antiquark oppure da tre quark o tre antiquark. I quark e gli antiquark hanno cariche frazionarie di  $\pm e/3$  o  $\pm 2e/3$ . Tuttavia, poiché i quark non possono essere osservati individualmente e per ragioni storiche, non consideriamo la loro carica come la carica elementare.

Vedete spesso frasi del tipo «la carica distribuita su una sfera», «la quantità di carica trasferita» e «la carica portata da un elettrone», che suggeriscono che la carica sia una sostanza. (In effetti queste espressioni sono già apparse in questo capitolo.) Dovreste, tuttavia, tenere a mente che cosa si intende: le *particelle* sono ciò che forma una sostanza e la carica non è che una delle loro proprietà, proprio come la massa.

Quando una grandezza fisica come la carica può solo assumere valori discreti anziché valori qualunque, diciamo che la grandezza è **quantizzata**. È possibile, per esempio, trovare una particella che non ha alcuna carica o ha carica  $+10e$  oppure  $-6e$ , ma non è possibile trovare una particella con una carica, per esempio, pari a  $3,57e$ .

Il quanto di carica è piccolo. Per esempio, in un filamento di una vecchia lampadina elettrica da 100 W circa  $10^{19}$  cariche elementari entrano nella lampadina in ogni secondo e altrettante la lasciano. Tuttavia, la granularità dell'elettricità non appare in fenomeni di larga scala come questi (la lampadina non sfarfal-la con ciascun elettrone che entra o esce).



#### VERIFICA 4

Inizialmente una sfera A ha una carica di  $-50e$  e una sfera B ha una carica di  $+20e$ . Le sfere sono dello stesso materiale conduttore e hanno dimensioni identiche. Se poi le sfere vengono a contatto, quale è la carica risultante sulla sfera A?

#### Problema svolto 21.4 Repulsione elettrica reciproca in un nucleo

Il nucleo di un atomo di ferro ha un raggio di circa  $4,0 \cdot 10^{-15}$  m e contiene 26 protoni.

(a) Qual è il modulo della forza elettrostatica repulsiva che agisce tra due dei protoni che sono separati da una distanza di  $4,0 \cdot 10^{-15}$  m?

#### SOLUZIONE (a)

I protoni possono essere trattati come particelle cariche, cosicché il modulo della forza elettrostatica esercitata su un protone dall'altro è data dalla legge di Coulomb.

**Calcoli.** La Tabella 21.1 ci dice che la carica di un protone è  $+e$ . Quindi, l'equazione 21.4 ci dà

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = \frac{(8,99 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)(1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C})^2}{(4,0 \cdot 10^{-15} \text{ m})^2} = 14 \text{ N}$$

**Mancata esplosione.** Questa è una forza piccola se agisce, per esempio, su un oggetto macroscopico come un melone, ma è una forza enorme se agisce su un protone. Forze del genere dovrebbero far esplodere il nucleo di un qualsiasi elemento tranne l'idrogeno (che ha un solo protone nel suo nucleo). Tuttavia, ciò non accade nemmeno in nuclei con molti protoni. Quindi, deve esserci una qualche forza attrattiva enorme che contrasta questa forza elettrostatica repulsiva enorme.

(b) Qual è il modulo della forza gravitazionale che agisce tra quegli stessi due protoni?

#### SOLUZIONE (b)

Poiché i protoni sono particelle, il modulo della forza gravitazionale esercitata da uno di essi sull'altro è dato dall'equazione di Newton per la forza gravitazionale (equazione 21.2).

**Calcoli.** Con  $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$  kg per la massa di un protone, l'equazione 21.2 ci dà

$$F = G \frac{m_p^2}{r^2} = (6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2) \frac{(1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg})^2}{(4,0 \cdot 10^{-15} \text{ m})^2} = 1,2 \cdot 10^{-35} \text{ N}$$

**Debole vs forte.** Questo risultato ci dice che la forza gravitazionale (attrattiva) è di gran lunga troppo debole per contrastare le forze elettrostatiche repulsive. Piuttosto, i protoni sono legati assieme da una forza enorme chiamata (giustamente)

*forza nucleare forte*, che agisce solo tra protoni (e neutroni) quando sono vicini, come in un nucleo.

Sebbene la forza gravitazionale sia infinitamente più debole di quella elettrostatica, è più importante in situazioni su larga scala, perché è sempre attrattiva. Questo vuol dire che può tenere insieme molti corpi piccoli in corpi grandi con masse enormi, come i pianeti e le stelle che poi esercitano intense forze gravitazionali. La forza elettrostatica, d'altro canto, è repulsiva per cariche dello stesso segno, perciò non è in grado di tenere insieme cariche positive o cariche negative in ampie concentrazioni che poi eserciterebbero intense forze elettrostatiche.

## 21.3 LA CARICA SI CONSERVA

### Idee chiave

- La carica elettrica risultante di un qualunque sistema isolato si conserva sempre.
- Se due particelle cariche subiscono un processo di annichilazione, esse hanno cariche di segno opposto.
- Se due particelle cariche appaiono come risultato di un processo di creazione di coppie, esse hanno cariche di segno opposto.

### La carica si conserva

Se strofinate una bacchetta di vetro con un panno di seta, una carica positiva appare sulla bacchetta. Le misure mostrano che una carica negativa uguale in valore assoluto a quella positiva appare sulla seta. Questo suggerisce che lo strofinamento non crea carica, ma semplicemente la trasferisce da un corpo all'altro, alterando la neutralità di carica di ciascun corpo durante il processo. Questa ipotesi di **conservazione della carica**, proposta per la prima volta da Benjamin Franklin, ha resistito alla prova di analisi approfondite, sia per corpi carichi su larga scala sia per gli atomi, i nuclei e le particelle elementari. Non sono mai state trovate eccezioni. Quindi, aggiungiamo la carica elettrica alla nostra lista di grandezze, comprendente l'energia, la quantità di moto e il momento angolare, che obbediscono a leggi di conservazione.

Esempi importanti di conservazione della carica si verificano nel *decadimento radioattivo* dei nuclei, detti *radionuclidi*. Nel processo, un nucleo si trasforma (diventa) in un nucleo di tipo diverso. Per esempio, il nucleo di uranio-238 ( ${}^{238}_{92}\text{U}$ ) si trasforma in un nucleo di torio-234 ( ${}^{234}_{90}\text{Th}$ ) emettendo una particella alfa. Questa particella può essere indicata con il simbolo  $\alpha$ , ma poiché ha la stessa struttura del nucleo di elio-4, può anche essere indicata con il simbolo  ${}^4_2\text{He}$ . In questi simboli usiamo la notazione chimica per l'elemento. Il numero in alto a sinistra del simbolo dell'elemento è il *numero di massa*  $A$ , che dà il numero totale di protoni e neutroni nel nucleo (collettivamente detti *nucleoni*), e il numero in basso a sinistra è il *numero atomico* o *numero di carica*  $Z$ , che dà il numero di protoni. L'Appendice E riporta i simboli e i valori di  $Z$  di tutti gli elementi.

Possiamo scrivere il decadimento alfa dell'uranio-238 come



Il nucleo di uranio iniziale è detto *nucleo padre* radioattivo e il risultante nucleo di torio è detto *nucleo figlio*. Notate la conservazione della carica: a sinistra il nucleo padre ha 92 protoni (e quindi una carica di  $+92e$ ) e a destra i due nuclei insieme hanno 92 protoni (e quindi la stessa carica). Anche il numero di massa  $A$  si conserva, ma questo non è ciò su cui ci concentriamo qui.

Un altro tipo di decadimento radioattivo è la *cattura elettronica*, nella quale un nucleo padre «cattura» uno degli elettroni interni dell'atomo per formare un neutrone (che rimane nel nucleo figlio) e per rilasciare un *neutrino*  $\nu$  (che non ha carica):



Il processo riduce di un'unità il numero atomico  $Z$ , ma la carica complessiva si conserva: la carica totale a sinistra è  $+e + (-e) = 0$  e la carica totale a destra è  $0 + 0 = 0$ . Dopo la cattura, un elettrone esterno può cadere nel posto vuoto lasciato dall'elettrone catturato. Tale transizione può rilasciare un raggio X. Alternativamente, può

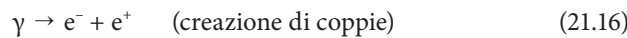
fornire l'energia affinché un altro degli elettroni esterni sfugga dall'atomo, un processo scoperto per la prima volta da Lise Meitner nel 1922 e poi, indipendentemente, da Pierre Auger nel 1923. Oggi questo processo è usato nella terapia del cancro: un radionuclide che subisce una cattura elettronica è incapsulato e posto vicino alle cellule cancerose così che gli *elettroni di Auger-Meitner* possano danneggiare in modo letale tali cellule e ridurre il cancro.

Un altro esempio di conservazione della carica si ha quando un elettrone  $e^-$  (la cui carica è  $-e$ ) e la sua antiparticella, il *positrone*  $e^+$  (la cui carica è  $+e$ ), subiscono un processo di *annichilazione*, nel quale si trasformano in due raggi *gamma* (radiazione ad alta energia):



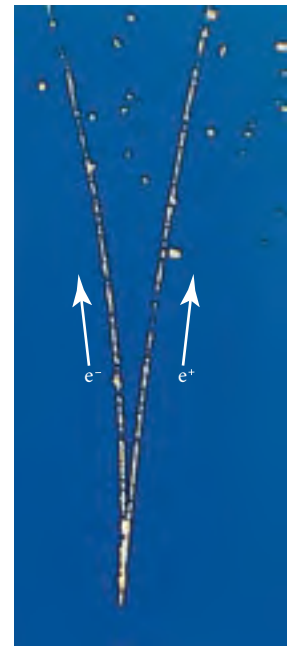
Nell'applicare il principio di conservazione della carica dobbiamo sommare algebricamente le cariche, con un'attenzione particolare ai loro segni. Nel processo di annichilazione dell'equazione 21.15, quindi, la carica complessiva del sistema è nulla prima e dopo l'evento. La carica è conservata.

Nella *creazione di coppie*, il processo opposto all'annichilazione, la carica si conserva. In questo processo, un raggio gamma si trasforma in un elettrone e in un positrone:



La **Figura 21.10** mostra la creazione di coppie in una camera a bolle. (Si tratta di un dispositivo in cui un liquido è improvvisamente portato a una temperatura superiore al suo punto di ebollizione. Se una particella carica lo attraversa, si formano minuscole bolle di vapore lungo il percorso della particella.)

Un raggio gamma è entrato nella camera dal basso e a un certo punto si è trasformato in un elettrone e in un positrone. Poiché queste nuove particelle erano cariche e in movimento, ciascuna ha lasciato una traccia di bollicine. (Le tracce erano curve perché nella camera è stato generato un campo magnetico.) Il raggio gamma, essendo elettricamente neutro, non ha lasciato traccia. Nonostante ciò, potete dire esattamente dove è avvenuta la creazione di coppie: nella punta della V curva, dove cominciano le tracce dell'elettrone e del positrone.



**Figura 21.10** Una fotografia delle tracce di bolle lasciate in una camera a bolle da un elettrone e da un positrone. La coppia di particelle è stata creata da un raggio gamma entrato nella camera direttamente dal basso. Poiché il raggio gamma è elettricamente neutro, non ha generato una traccia rivelatrice di bolle lungo il suo cammino, come hanno invece fatto l'elettrone e il positrone.

## Scansioni PET

Un metodo ampiamente usato per ottenere immagini dell'interno del corpo umano è la *tomografia a emissione di protoni* (*proton emission tomography*, PET). Una sostanza che emette particelle  $\beta^+$  (*positroni*) viene iniettata nel corpo del paziente, dove tenderà a raccogliersi in un tumore. Quando uno dei nuclei emette un positrone mentre un protone si trasforma in un neutrone, il positrone subisce un'annichilazione con un elettrone del tessuto circostante che si trovi entro un micron dal nucleo (equazione 21.15). Possiamo approssimare la quantità di moto totale del positrone e dell'elettrone a zero. Dalla conservazione della quantità di moto, i due raggi gamma che sono prodotti devono anch'essi avere quantità di moto totale nulla, il che richiede che viaggino lontano dal punto in cui vengono prodotti e in direzioni opposte.

Un apparato per la PET è formato da rivelatori di raggi gamma che sono generalmente disposti ad anello attorno al sito di produzione nel paziente (**Figura 21.11a**). Quando due rivelatori sono stimolati ai lati opposti dell'anello (**Figura 21.11b**) in un intervallo di tempo ristretto, il sistema rintraccia i percorsi dei raggi gamma per determinare la localizzazione del sito di produzione e quindi la posizione del tumore. Un'immagine della posizione viene costruita mentre la localizzazione del sito è eseguita ripetutamente con coppie di raggi gamma emesse in varie direzioni dentro l'anello.



a)



b)

**Figura 21.11 a)** Paziente in un apparecchio per scansioni PET. **b)** L'annichilazione di un positrone e di un elettrone invia raggi gamma in direzioni opposte verso l'anello dei rivelatori.

## Sintesi

**Carica elettrica** L'intensità dell'interazione elettrica di una particella con gli oggetti circostanti dipende dalla sua **carica elettrica** (di solito rappresentata con il simbolo  $q$ ) che può essere positiva o negativa. Particelle con cariche dello stesso segno si respingono, mentre particelle con cariche di segno opposto si attraggono. Un oggetto con uguali quantità di carica dei due tipi è elettricamente neutro, mentre un oggetto con una carica non bilanciata è elettricamente carico e ha un eccesso di carica.

I **conduttori** sono materiali nei quali un numero significativo di elettroni è libero di muoversi. Le particelle cariche nei materiali **non conduttori (isolanti)** non sono libere di muoversi.

L'intensità della corrente elettrica  $i$  è data dalla rapidità  $dq/dt$  con la quale la carica passa attraverso un punto:

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (\text{corrente elettrica}) \quad (21.3)$$

**Legge di Coulomb** La legge di Coulomb descrive la forza elettrostatica (o forza elettrica) che agisce tra due particelle cariche. Se le particelle hanno cariche  $q_1$  e  $q_2$ , sono separate da una distanza  $r$  e sono ferme (o si muovono solo lentamente) l'una rispetto all'altra, allora il modulo della forza agente su ciascuna per effetto dell'altra è dato da

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{r^2} \quad (\text{legge di Coulomb}) \quad (21.4)$$

dove  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$  è la **costante dielettrica del vuoto**. Il rapporto  $1/(4\pi\epsilon_0)$  è spesso sostituito con la **costante elettrostatica** (o **costante di Coulomb**)  $k = 8,99 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ .

Il vettore della forza elettrostatica che agisce su una particella carica per effetto di una seconda particella carica è diretto verso quest'ultima se le cariche sono di segno opposto e nel verso opposto se le cariche sono dello stesso segno. Come per altri tipi di forze, se più forze elettrostatiche agiscono su una particella, la forza risultante è il vettore somma (non la somma scalare) delle singole forze.

I due teoremi del guscio per l'elettrostatica sono:

**Primo teorema del guscio:** una particella carica posta all'esterno di un guscio con carica uniformemente distribuita sulla sua superficie è attratta o respinta come se tutta la carica del guscio fosse concentrata in una particella posta nel suo centro.

**Secondo teorema del guscio:** una particella carica posta all'interno di un guscio con carica uniformemente distribuita sulla sua superficie esterna non risente di alcuna forza risultante dovuta al guscio.

La carica su un guscio sferico conduttore si distribuisce uniformemente sulla superficie (esterna).

**Carica elementare** La carica elettrica è quantizzata (limitata a certi valori). La carica di una particella può essere scritta come  $ne$ , dove  $n$  è un numero intero positivo o negativo ed  $e$  è la carica elementare, che è il valore assoluto della carica dell'elettrone e del protone ( $\approx 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ).

**Conservazione della carica** La carica elettrica totale di qualunque sistema isolato si conserva sempre.

## Domande

1. La **Figura 21.12** mostra quattro configurazioni in cui cinque particelle cariche sono uniformemente spaziate lungo un asse. I valori delle cariche sono indicati per tutte le particelle tranne quella centrale, che ha la stessa carica in tutte e quattro le configurazioni. Mettete le configurazioni in ordine decrescente del modulo della forza elettrostatica esercitata sulla particella centrale.

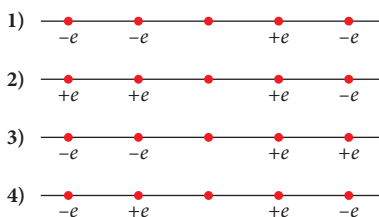


Figura 21.12 Domanda 1.

2. La **Figura 21.13** mostra tre coppie di sfere identiche che sono messe a contatto e poi separate. Le cariche iniziali presenti sulle sfere sono indicate. Mettete le coppie in ordine decrescente (a) del modulo della carica trasferita durante il contatto e (b) della carica rimasta sulla sfera carica positivamente.

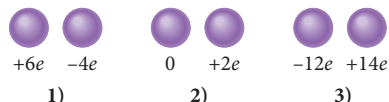


Figura 21.13 Domanda 2.

3. La **Figura 21.14** mostra quattro configurazioni in cui delle cariche puntiformi sono in posizioni fisse su un asse. In quali esiste un punto dell'asse a sinistra delle cariche in cui un elettrone sarà in equilibrio?

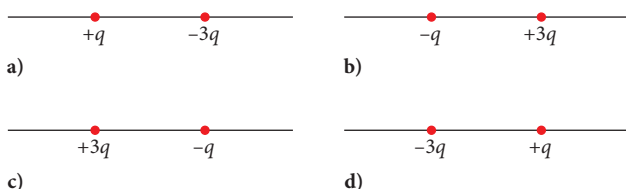


Figura 21.14 Domanda 3.

4. La **Figura 21.15** mostra due particelle cariche su un asse. Le particelle sono libere di muoversi. Tuttavia, una terza particella carica può essere posta in un dato punto in modo che tutte e tre le particelle siano in equilibrio. (a) Questo punto si trova a sinistra delle prime due particelle, alla loro destra o tra le particelle? (b) La terza carica dovrebbe essere positiva o negativa? (c) L'equilibrio è stabile o instabile?



Figura 21.15 Domanda 4.

5. Nella **Figura 21.16** una particella centrale di carica  $-q$  è circondata da due anelli concentrici di particelle cariche. Quali sono il modulo, la direzione e il verso della forza elettrostatica risultante che agisce sulla particella centrale ed è dovuta a tutte le altre particelle? (*Suggerimento:* considerate la simmetria.)

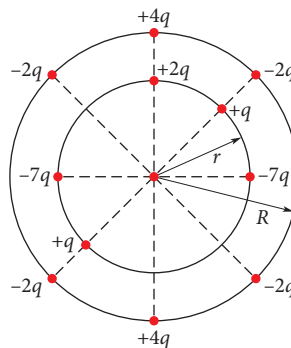


Figura 21.16 Domanda 5.

6. Una palla carica positivamente è posta vicino a un conduttore isolato elettricamente neutro. Il conduttore è poi collegato a terra mentre la palla è tenuta vicina. Il conduttore è carico positivamente, negativamente o è neutro (a) se la palla è prima allontanata e poi la messa a terra è rimossa e (b) se la messa a terra è rimossa e poi la palla è allontanata?

7. La **Figura 21.17** mostra tre situazioni che coinvolgono una particella carica e un guscio sferico uniformemente carico. Le cariche



sono date e i raggi dei gusci sono indicati. Mettete le situazioni in ordine decrescente del modulo della forza che agisce sulla particella ed è dovuta alla presenza del guscio.

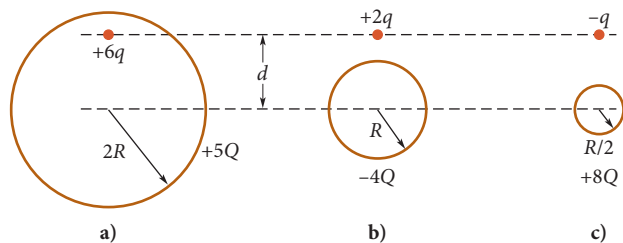


Figura 21.17 Domanda 7.

8. La Figura 21.18 mostra quattro disposizioni di particelle cariche. Mettete le disposizioni in ordine decrescente del modulo della forza elettrostatica risultante esercitata sulla particella con carica +Q.

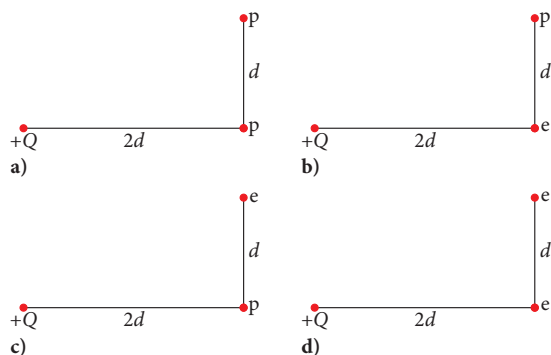


Figura 21.18 Domanda 8.

9. La Figura 21.19 mostra quattro situazioni in cui delle particelle di carica +q o -q sono fisse nelle loro posizioni. In ciascuna situazione le particelle sull'asse x sono equidistanti dall'asse y. Considerate dapprima la particella centrale nella situazione 1: essa risente di una forza elettrostatica esercitata da ciascuna delle altre due particelle. (a) I moduli F di queste due forze sono uguali o diversi? (b) Il modulo della forza risultante che agisce sulla particella centrale è uguale, maggiore o minore di 2F? (c) Le componenti x delle due forze si sommano o si elidono? (d) Le loro componenti y si sommano o si elidono? (e) La direzione e il verso della forza risultante che agisce sulla particella centrale sono quelli delle componenti che si elidono o di quelle che si sommano? (f) Quali sono la direzione e il verso di tale forza risultante? Ora considerate le situazioni restanti: quali sono la direzione e il verso della forza risultante che agisce sulla particella centrale (g) per la situazione 2, (h) per la situazione 3 e (i) per la situazione 4? (In ciascuna situazione considerate la simmetria della distribuzione delle cariche e determinate le componenti che si elidono e le componenti che si sommano.)

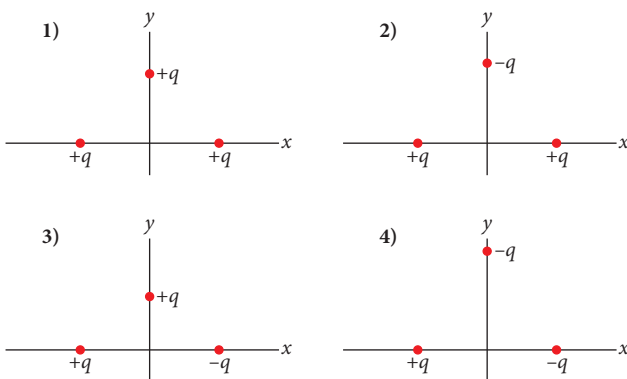


Figura 21.19 Domanda 9.

10. Nella Figura 21.20 una particella centrale di carica -2q è circondata da una disposizione quadrata di particelle cariche separa-

te da una distanza d o d/2 lungo il perimetro di un quadrato. Quali sono il modulo, la direzione e il verso della forza elettrostatica risultante che agisce sulla carica centrale per effetto di tutte le altre particelle? (Suggerimento: considerazioni di simmetria possono semplificare molto la quantità di lavoro richiesta in questo caso.)

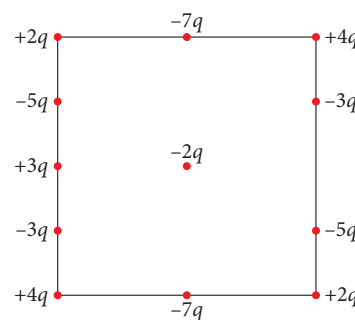


Figura 21.20 Domanda 10.

11. La Figura 21.21 mostra tre bolle conduttrici identiche A, B e C che galleggiano in un recipiente conduttore connesso a terra con un filo. Le bolle hanno inizialmente carica identica. La bolla A urta il soffitto del recipiente e poi la bolla B. Successivamente la bolla B urta la bolla C, la quale infine si dirige verso il pavimento del recipiente. Quando la bolla C raggiunge il pavimento, una carica -3e è trasferita verso l'alto attraverso il filo da terra al recipiente, come indicato. (a) Qual era la carica iniziale di ciascuna bolla? Quando (b) la bolla A e (c) la bolla B raggiungono il pavimento, qual è la carica totale trasferita attraverso il filo? (d) Durante l'intero processo, qual è la carica totale trasferita attraverso il filo?

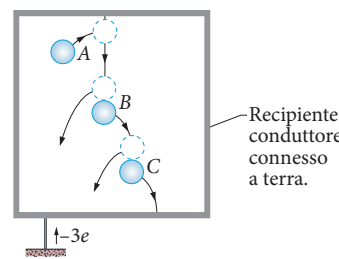


Figura 21.21 Domanda 11.

12. La Figura 21.22 mostra quattro situazioni in cui un protone centrale è parzialmente circondato da protoni o da elettroni fissi nelle loro posizioni lungo una semicirconferenza. Gli angoli θ sono identici e così gli angoli φ. (a) In ciascuna situazione, quali sono la direzione e il verso della forza risultante che agisce sul protone centrale ed è dovuta alle altre particelle? (b) Mettete le quattro situazioni in ordine decrescente del modulo della forza risultante che agisce sul protone centrale.

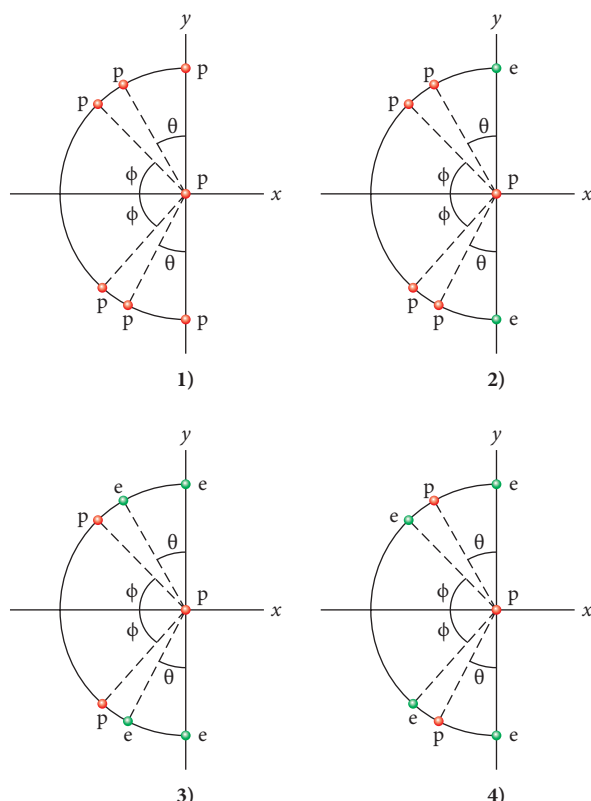


Figura 21.22 Domanda 12.

## Problemi

**MS** Soluzioni disponibili nel Manuale delle soluzioni dettagliate

**BIO** Applicazione biomedica

### Paragrafo 21.1 Legge di Coulomb

**1. • MS** Della carica  $Q$ , che si trova inizialmente su una minuscola sfera, una porzione  $q$  deve essere trasferita a una seconda sfera vicina. Entrambe le sfere possono essere considerate come particelle fisse a una certa distanza l'una dall'altra. Per quale valore di  $q/Q$  la forza elettrostatica tra le due sfere sarà massima?

**2. •** Le sfere conduttrici identiche e isolate 1 e 2 hanno cariche uguali e sono tenute a una distanza molto grande rispetto ai loro diametri (Figura 21.23a). La forza elettrostatica che agisce sulla sfera 2 per effetto della sfera 1 è  $F$ . Supponete che una terza sfera 3 identica alle altre, dotata di un manico isolante e inizialmente neutra, sia messa a contatto prima con la sfera 1 (Figura 21.23b), poi con la sfera 2 (Figura 21.23c) e infine sia rimossa (Figura 21.23d). La forza elettrostatica che ora agisce sulla sfera 2 ha modulo  $F'$ . Qual è il rapporto  $F'/F$ ?

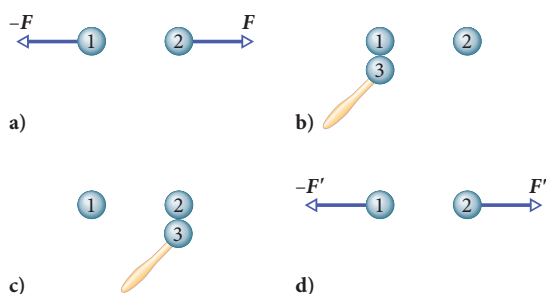


Figura 21.23 Problema 2.

**3. • MS** Quale deve essere la distanza tra una carica puntiforme  $q_1 = 26,0 \mu\text{C}$  e una carica puntiforme  $q_2 = -47,0 \mu\text{C}$  affinché la forza elettrostatica tra di esse abbia modulo  $5,70 \text{ N}$ ?

**4. •** Durante la scarica a terra di un tipico fulmine scorre una corrente di  $2,5 \cdot 10^4 \text{ A}$  per un tempo di  $20 \mu\text{s}$ . Quanta carica viene trasferita in questo evento?

**5. •** Una particella di carica  $+3,00 \cdot 10^{-6} \text{ C}$  dista  $12,0 \text{ cm}$  da una seconda particella di carica  $-1,50 \cdot 10^{-6} \text{ C}$ . Calcolate il modulo della forza elettrostatica che agisce tra le particelle.

**6. •** Due particelle ugualmente cariche sono tenute a una distanza di  $3,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  e poi sono rilasciate da ferme. La loro accelerazione iniziale risulta essere  $7,0 \text{ m/s}^2$  per la prima particella e  $9,0 \text{ m/s}^2$  per la seconda particella. Se la massa della prima particella è  $6,3 \cdot 10^{-7} \text{ kg}$ , quali sono (a) la massa della seconda particella e (b) il valore assoluto della carica di ciascuna particella?

**7. ••** Nella Figura 21.24 tre particelle cariche giacciono lungo un asse  $x$ . Le particelle 1 e 2 sono tenute ferme. La particella 3 è libera di muoversi, ma la forza elettrostatica risultante che agisce su di essa ed è dovuta alle particelle 1 e 2 è zero. Se  $L_{23} = L_{12}$ , qual è il rapporto  $q_1/q_2$ ?

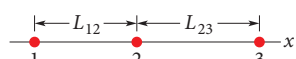


Figura 21.24 Problemi 7 e 40.

**8. ••** Nella Figura 21.25 tre sfere conduttrici identiche hanno inizialmente le seguenti cariche: sfera A,  $4Q$ ; sfera B,  $-6Q$ ; sfera C,  $0$ . Le sfere A e B sono ferme nelle loro posizioni, con una distanza da centro a centro molto maggiore delle dimensioni delle sfere. Vengono condotti due esperimenti. Nell'esperimento 1 la sfera C è messa a contatto con la sfera A, poi (separatamente) con la sfera B, e infine è rimossa. Nell'esperimento 2, cominciando con le stesse condizioni iniziali, la procedura è invertita: la sfera C è messa a contatto con la sfera B, poi (separatamente) con la sfera A, e infine è rimossa. Qual è il rapporto tra la forza

elettrostatica tra A e B alla fine dell'esperimento 2 e quella alla fine dell'esperimento 1?

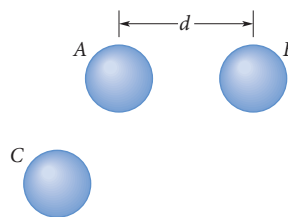


Figura 21.25 Problema 8.

**9. •• MS** Due sfere conduttrici identiche, fisse nelle loro posizioni, si attraggono con una forza elettrostatica di  $0,108 \text{ N}$  quando la distanza tra i loro centri è di  $50,0 \text{ cm}$ . Le sfere vengono poi collegate con un filo conduttore. Quando il filo viene rimosso, le sfere si respingono con una forza elettrostatica di  $0,0360 \text{ N}$ . Delle cariche iniziali sulle sfere, che hanno una carica totale positiva, qual era (a) la carica negativa su una di esse e (b) la carica positiva sull'altra?

**10. ••** Nella Figura 21.26 quattro particelle formano un quadrato. Le cariche sono  $q_1 = q_4 = Q$  e  $q_2 = q_3 = q$ . (a) Quanto vale  $Q/q$  se la forza elettrostatica risultante sulle particelle 1 e 4 è zero? (b) Esiste un valore di  $q$  che rende la forza elettrostatica risultante che agisce su ciascuna delle quattro particelle pari a zero? Spiegate.

**11. ••** Nella Figura 21.26 le particelle hanno cariche  $q_1 = -q_2 = 100 \text{ nC}$  e  $q_3 = -q_4 = 200 \text{ nC}$ , e  $a = 5,0 \text{ cm}$ . Quali sono (a) le componenti  $x$  e (b) le componenti  $y$  della forza elettrostatica risultante che agisce sulla particella 3?

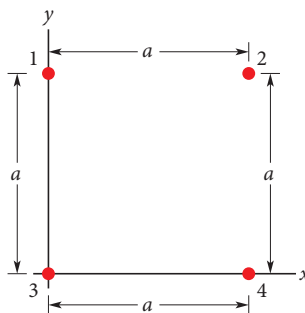


Figura 21.26 Problemi 10 e 11.

**12. ••** Due particelle sono ferme su un asse  $x$ . La particella 1 con carica  $40 \mu\text{C}$  è posta in  $x = -2,0 \text{ cm}$ ; la particella 2 con carica  $Q$  è posta in  $x = 3,0 \text{ cm}$ . La particella 3 ha una carica di valore assoluto  $20 \mu\text{C}$  e viene rilasciata da ferma sull'asse  $y$  in  $y = 2,0 \text{ cm}$ . Qual è il valore di  $Q$  se l'accelerazione iniziale della particella 3 è diretta nel verso positivo (a) dell'asse  $x$  e (b) dell'asse  $y$ ?

**13. ••** Nella Figura 21.27 la particella 1 con carica  $+1,0 \mu\text{C}$  e la particella 2 con carica  $-3,0 \mu\text{C}$  sono tenute a una distanza  $L = 10,0 \text{ cm}$  l'una dall'altra su un asse  $x$ . Se la particella 3 con carica ignota  $q_3$  deve essere posizionata in modo tale che la forza elettrostatica risultante che agisce su di essa per effetto delle particelle 1 e 2 sia pari a zero, quali devono essere (a) la coordinata  $x$  e (b) la coordinata  $y$  della particella 3?

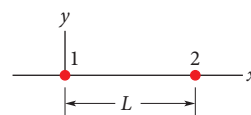


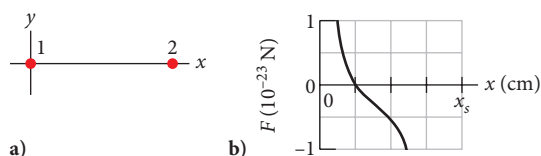
Figura 21.27 Problemi 13, 19, 30 e 58.

**14. ••** Tre particelle sono ferme su un asse  $x$ . La particella 1 di carica  $q_1$  è posta in  $x = -a$ , mentre la particella 2 di carica  $q_2$  è po-

sta in  $x = +a$ . Se la forza elettrostatica risultante che esercitano su una particella 3 di carica  $+Q$  deve essere zero, quale deve essere il rapporto  $q_1/q_2$  quando la particella 3 si trova (a) in  $x = +0,500a$  e (b) in  $x = +1,50a$ ?

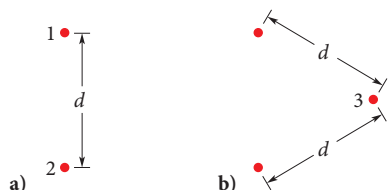
**15. ••** Le cariche e le coordinate di due particelle cariche tenute ferme in un piano  $xy$  sono  $q_1 = +3,0 \mu\text{C}$ ,  $x_1 = 3,5 \text{ cm}$ ,  $y_1 = 0,50 \text{ cm}$  e  $q_2 = -4,0 \mu\text{C}$ ,  $x_2 = -2,0 \text{ cm}$ ,  $y_2 = 1,5 \text{ cm}$ . Trovate (a) il modulo e (b) la direzione e il verso della forza elettrostatica che agisce sulla particella 2 ed è dovuta alla particella 1. In quali coordinate (c)  $x$  e (d)  $y$  dovrebbe essere posta una terza particella di carica  $q_3 = +4,0 \mu\text{C}$  affinché la forza elettrostatica risultante che agisce sulla particella 2 ed è dovuta alle particelle 1 e 3 sia nulla?

**16. ••** Nella **Figura 21.28a** la particella 1 (di carica  $q_1$ ) e la particella 2 (di carica  $q_2$ ) sono fisse nelle loro posizioni su un asse  $x$  a  $8,00 \text{ cm}$  di distanza l'una dall'altra. La particella 3 (di carica  $q_3 = +8,00 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ) deve essere posta sulla retta che unisce la particella 1 e la particella 2 in modo tale che esse producano sulla particella 3 una forza elettrostatica risultante  $F_{3,\text{tot}}$ . La **Figura 21.28b** mostra la componente  $x$  di tale forza in funzione della coordinata  $x$  in cui la particella 3 è posta. La scala dell'asse  $x$  è data da  $x_s = 8,0 \text{ cm}$ . Quali sono (a) il segno della carica  $q_1$  e (b) il rapporto  $q_2/q_1$ ?



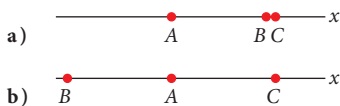
**Figura 21.28** Problema 16.

**17. ••** Nella **Figura 21.29a** le particelle 1 e 2 hanno carica  $20,0 \mu\text{C}$  e sono tenute a una distanza  $d = 1,50 \text{ m}$  l'una dall'altra. (a) Qual è il modulo della forza elettrostatica che agisce sulla particella 1 ed è dovuta alla particella 2? (b) Nella **Figura 21.29b** la particella 3 con carica  $20,0 \mu\text{C}$  è posta in modo da completare un triangolo equilatero. (b) Qual è il modulo della forza elettrostatica risultante che agisce sulla particella 1 ed è dovuta alle particelle 2 e 3?



**Figura 21.29** Problema 17.

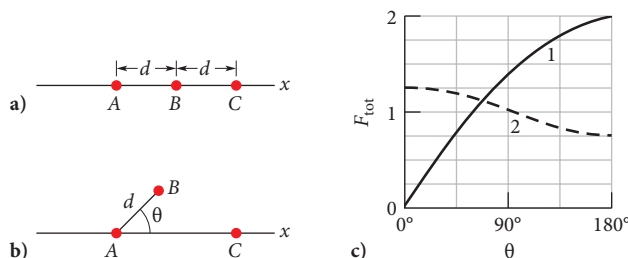
**18. ••** Nella **Figura 21.30a** tre particelle cariche positivamente sono fisse su un asse  $x$ . Le particelle  $B$  e  $C$  sono così vicine l'una all'altra che possono essere considerate come poste alla stessa distanza da  $A$ . La forza risultante sulla particella  $A$  dovuta alle particelle  $B$  e  $C$  ha modulo  $2,014 \cdot 10^{-23} \text{ N}$  ed è diretta nel verso negativo dell'asse  $x$ . Nella **Figura 21.30b** la particella  $B$  è stata spostata dalla parte opposta di  $A$ , ma è ancora alla stessa distanza da quest'ultima. Ora la forza risultante che agisce su  $A$  ha modulo  $2,877 \cdot 10^{-24} \text{ N}$  ed è diretta nel verso negativo dell'asse  $x$ . Qual è il rapporto  $q_C/q_B$ ?



**Figura 21.30** Problema 18.

**19. •• MS** Nella **Figura 21.27** la particella 1 di carica  $+q$  e la particella 2 di carica  $+4,00q$  sono tenute a una distanza  $L = 9,00 \text{ cm}$  l'una dall'altra su un asse  $x$ . Se la particella 3 di carica  $q_3$  deve essere posizionata in modo tale che le tre particelle rimangano ferme una volta rilasciate, quali devono essere (a) la coordinata  $x$  e (b) la coordinata  $y$  della particella 3 e (c) il rapporto  $q_3/q$ ?

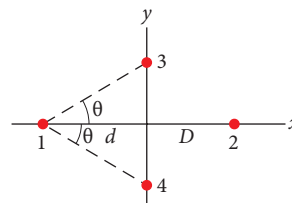
**20. •••** La **Figura 21.31a** mostra una disposizione di tre particelle cariche separate da una distanza  $d$ . Le particelle  $A$  e  $C$  sono fisse su un asse  $x$ , mentre la particella  $B$  può essere spostata lungo una circonferenza con centro in  $A$ . Durante il moto una retta lungo il raggio da  $A$  a  $B$  forma un angolo  $\theta$  con il semiasse positivo dell'asse  $x$  (**Figura 21.31b**). Le curve nella **Figura 21.31c** mostrano, per due situazioni, il modulo  $F_{\text{tot}}$  della forza elettrostatica risultante che agisce sulla particella  $A$  per effetto delle altre particelle. La forza risultante è data in funzione dell'angolo  $\theta$  e come multiplo di una quantità base  $F_0$ . Per esempio, sulla curva 1 per  $\theta = 180^\circ$  vediamo che  $F_{\text{tot}} = 2F_0$ . (a) Per la situazione che corrisponde alla curva 1, qual è il rapporto tra la carica della particella  $C$  e quella della particella  $B$  (incluso il segno)? (b) Per la situazione che corrisponde alla curva 2, qual è questo rapporto?



**Figura 21.31** Problema 20.

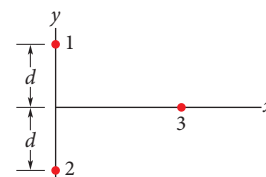
**21. •••** Un guscio sferico isolante, di raggio interno  $4,0 \text{ cm}$  e raggio esterno  $6,0 \text{ cm}$ , ha una carica distribuita in modo non uniforme nel suo volume compreso tra la sua superficie interna e quella esterna. La densità volumica di carica  $\rho$  è la carica per unità di volume misurata in coulomb al metro cubo. Per questo guscio  $\rho = b/r$ , dove  $r$  è la distanza in metri dal centro del guscio e  $b = 3,0 \mu\text{C}/\text{m}^2$ . Quanto vale la carica totale presente sul guscio sferico?

**22. •••** La **Figura 21.32** mostra una disposizione di quattro particelle cariche, con un angolo  $\theta = 30,0^\circ$  e una distanza  $d = 2,00 \text{ cm}$ . La particella 2 ha carica  $q_2 = +8,00 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ; le particelle 3 e 4 hanno carica  $q_3 = q_4 = -1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ . (a) Qual è la distanza  $D$  tra l'origine e la particella 2 se la forza elettrostatica risultante sulla particella 1 dovuta alle altre particelle è zero? (b) Se le particelle 3 e 4 fossero avvicinate all'asse  $x$  mantenendo la loro simmetria attorno a quell'asse, il valore di  $D$  richiesto sarebbe maggiore, minore o uguale di quello del punto (a)?



**Figura 21.32** Problema 22.

**23. •••** Nella **Figura 21.33** le particelle 1 e 2 di carica  $q_1 = q_2 = 3,20 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  sono su un asse  $y$  a una distanza  $d = 17,0 \text{ m}$  dall'origine. La particella 3 di carica  $q_3 = 6,40 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  viene gradualmente spostata lungo l'asse  $x$  da  $x = 0$  a  $x = +5,0 \text{ m}$ . Per quali valori di  $x$  il modulo della forza elettrostatica esercitata sulla particella 3 dalle altre due particelle sarà (a) minimo e (b) massimo? Quali sono (c) il modulo minimo e (d) il modulo massimo?



**Figura 21.33** Problema 23.

**Paragrafo 21.2 La carica è quantizzata**

**24. •** Due minuscole gocce sferiche d'acqua, aventi un'identica carica di  $-1,00 \cdot 10^{-16}$  C, hanno i loro centri a 1,00 cm di distanza. (a) Qual è il modulo della forza elettrostatica che agisce tra essi? (b) Quanti elettroni in eccesso sono presenti su ciascuna goccia, che ha così una carica non bilanciata?

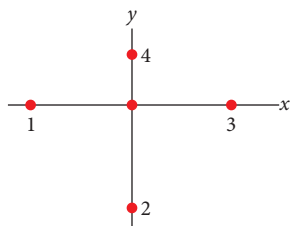
**25. •** Quanti elettroni occorrerebbe rimuovere da una moneta per lasciarle una carica di  $+1,0 \cdot 10^{-7}$  C?

**26. •** Qual è il modulo della forza elettrostatica che agisce tra uno ione di sodio con carica unitaria ( $\text{Na}^+$ , di carica  $+e$ ) e uno ione di cloro adiacente con carica unitaria ( $\text{Cl}^-$ , di carica  $-e$ ) in un cristallo di sale se gli ioni distano  $2,82 \cdot 10^{-10}$  m l'uno dall'altro?

**27. • MS** Il modulo della forza elettrostatica tra due ioni identici separati da una distanza di  $5,0 \cdot 10^{-10}$  m è di  $3,7 \cdot 10^{-9}$  N. (a) Qual è la carica di ciascuno ione? (b) Quanti elettroni «mancano» a ciascuno ione (dando di conseguenza allo ione una carica non bilanciata)?

**28. • BIO** Una corrente di 0,300 A attraverso il vostro torace può mandare in fibrillazione il vostro cuore, alterando il normale ritmo del battito cardiaco e danneggiando il flusso del sangue (e quindi dell'ossigeno) al cervello. Se questa corrente persiste per 2,00 min, quanti elettroni di conduzione attraversano il vostro torace?

**29. ••** Nella **Figura 21.34** le particelle 2 e 4, di carica  $-e$ , sono fisse su un asse  $y$  in  $y_2 = -10,0$  cm e in  $y_4 = 5,00$  cm. Le particelle 1 e 3, di carica  $-e$ , possono essere spostate lungo l'asse  $x$ . La particella 5, di carica  $+e$ , è fissa nell'origine. Inizialmente la particella 1 è in  $x_1 = -10,0$  cm e la particella 3 è in  $x_3 = 10,0$  cm. (a) In quale valore di  $x$  deve essere spostata la particella 1 per ruotare la direzione della forza elettrica risultante  $F_{\text{tot}}$  che agisce sulla particella 5 di  $30^\circ$  in senso antiorario? (b) Con la particella 1 fissa nella sua nuova posizione, in quale valore di  $x$  dovete spostare la particella 3 per ruotare  $F_{\text{tot}}$  riportandola nella sua direzione originale?



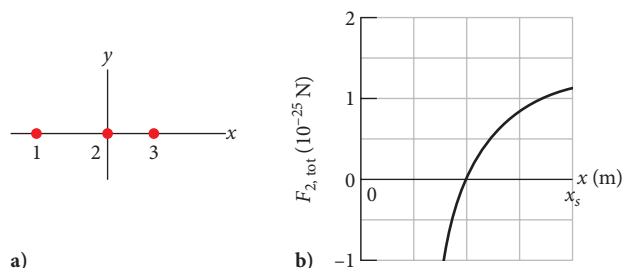
**Figura 21.34** Problema 29.

**30. ••** Nella **Figura 21.27** le particelle 1 e 2 sono fisse su un asse  $x$  a una distanza  $L = 8,00$  cm l'una dall'altra. Le loro cariche sono  $q_1 = +e$  e  $q_2 = -27e$ . La particella 3 con carica  $q_3 = +4e$  deve essere posta sulla retta che unisce le particelle 1 e 2 in modo che queste producano una forza elettrostatica risultante  $F_{3,\text{tot}}$  sulla particella 3. (a) In quali coordinate deve essere posta la particella 3 per rendere minimo il modulo di questa forza? (b) Qual è questo modulo minimo?

**31. ••** L'atmosfera terrestre è costantemente bombardata da protoni generati dai raggi cosmici provenienti da qualche parte dello spazio. Se tutti i protoni attraversassero l'atmosfera, ogni metro quadrato della superficie terrestre intercetterebbe protoni alla rapidità media di 1500 protoni al secondo. Quale sarebbe l'intensità della corrente elettrica intercettata dall'intera area della superficie del pianeta?

**32. ••** La **Figura 21.35a** mostra le particelle cariche 1 e 2 fisse su un asse  $x$ . La particella 1 ha una carica di valore assoluto  $|q_1| = 8,00e$ . La particella 3 di carica  $q_3 = +8,00e$  è inizialmente sull'asse  $x$  vicino alla particella 2. Poi la particella 3 è gradualmente spostata nel verso positivo dell'asse  $x$ . Come risultato, il modulo della forza elettrostatica risultante  $F_{2,\text{tot}}$  sulla particella 2 dovuta alle particelle 1 e 3 varia. La **Figura 21.35b** mostra la componente  $x$  della forza risultante in funzione della posizione  $x$  della particella 3. La scala dell'asse  $x$  è data da  $x_s = 0,80$  m. Il gra-

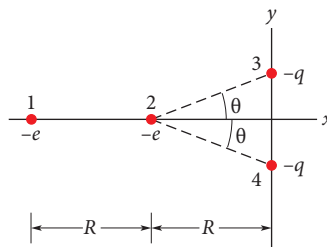
fico ha un asintoto in  $F_{2,\text{tot}} = 1,5 \cdot 10^{-25}$  N per  $x \rightarrow \infty$ . Come multiplo di  $e$  e includendo il segno, qual è la carica  $q_2$  della particella 2?



**Figura 21.35** Problema 32.

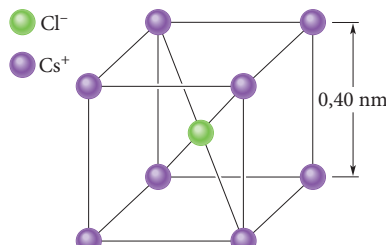
**33. ••** Calcolate la quantità di carica positiva (in coulomb) presente in  $250 \text{ cm}^3$  d'acqua (neutra). (Suggerimento: un atomo di idrogeno contiene un protone; un atomo di ossigeno contiene otto protoni.)

**34. •••** La **Figura 21.36** mostra gli elettroni 1 e 2 su un asse  $x$  e gli ioni carichi 3 e 4 di carica identica  $-q$  posti ad angoli  $\theta$  uguali. L'elettrone 2 è libero di muoversi; le altre tre particelle sono fisse a distanze orizzontali  $R$  dall'elettrone 2 e devono tenere l'elettrone 2 fermo nella sua posizione. Per valori fisicamente possibili di  $q \leq 5e$ , quali sono (a) il più piccolo valore di  $\theta$ , (b) il secondo valore più piccolo di  $\theta$  e (c) il terzo valore più piccolo di  $\theta$  per cui l'elettrone 2 è tenuto nella sua posizione?



**Figura 21.36** Problema 34.

**35. ••• MS** Nei cristalli del sale cloruro di cesio gli ioni  $\text{Cs}^+$  formano gli 8 vertici di un cubo e uno ione  $\text{Cl}^-$  è al centro del cubo (**Figura 21.37**). La lunghezza dello spigolo del cubo è  $0,40$  nm. A ciascuno degli ioni  $\text{Cs}^+$  manca un elettrone (e quindi ciascuno ha una carica  $+e$ ) e lo ione  $\text{Cl}^-$  ha un elettrone in eccesso (e quindi una carica  $-e$ ). (a) Qual è il modulo della forza elettrostatica risultante esercitata sullo ione  $\text{Cl}^-$  dagli otto ioni  $\text{Cs}^+$  situati ai vertici del cubo? (b) Se uno degli ioni  $\text{Cs}^+$  manca si dice che il cristallo ha un difetto; qual è il modulo della forza elettrostatica risultante esercitata sullo ione  $\text{Cl}^-$  dai rimanenti sette ioni  $\text{Cs}^+$ ?



**Figura 21.37** Problema 35.

**Paragrafo 21.3 La carica si conserva**

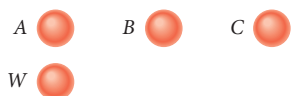
**36. •** Elettroni e positroni sono prodotti dalle trasformazioni nucleari di protoni e neutroni note come decadimento beta. (a) Se un protone si trasforma in un neutrone si produce un elettrone o un positrone? (b) Se un neutrone si trasforma in un protone si produce un elettrone o un positrone?

**37. • MS** Identificate l'elemento X nelle seguenti reazioni nucleari:  
 (a)  $^1\text{H} + ^9\text{Be} \rightarrow \text{X} + \text{n}$   
 (b)  $^{12}\text{C} + ^1\text{H} \rightarrow \text{X}$   
 (c)  $^{15}\text{N} + ^1\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + \text{X}$

L'Appendice F sarà d'aiuto.

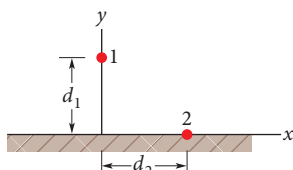
## Problemi di riepilogo

**38.** La **Figura 21.38** mostra quattro sfere conduttrici identiche che sono in realtà ben separate l'una dall'altra. La sfera *W* (che ha una carica iniziale nulla) è messa a contatto con la sfera *A* e poi viene allontanata. Successivamente la sfera *W* è messa a contatto con la sfera *B* (che ha una carica iniziale di  $-32e$ ) e poi viene allontanata. Infine, la sfera *W* è messa a contatto con la sfera *C* (che ha una carica iniziale di  $+48e$ ) e poi viene allontanata. La carica finale della sfera *W* è  $+18e$ . Qual era la carica iniziale sulla sfera *A*?



**Figura 21.38** Problema 38.

**39.** **MS** Nella **Figura 21.39** la particella 1 di carica  $+4e$  è sopra un pavimento a una distanza  $d_1 = 2,00$  mm da esso e la particella 2 di carica  $+6e$  è sul pavimento a una distanza orizzontale  $d_2 = 6,00$  mm dalla particella 1. Qual è la componente  $x$  della forza elettrostatica che agisce sulla particella 2 per effetto della particella 1?



**Figura 21.39** Problema 39.

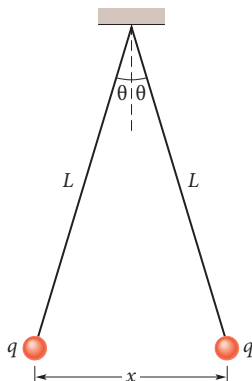
**40.** Nella **Figura 21.24** le particelle 1 e 2 sono fisse, mentre la particella 3 è libera di muoversi. Se la forza elettrostatica risultante sulla particella 3 dovuta alle particelle 1 e 2 è zero e  $L_{23} = 2,00L_{12}$ , qual è il rapporto  $q_1/q_2$ ?

**41.** (a) Quali cariche positive uguali dovrebbero essere poste sulla Terra e sulla Luna per neutralizzare la loro attrazione gravitazionale? (b) Perché non ti occorre conoscere la distanza Terra-Luna per risolvere questo problema? (c) Quanti kilogrammi di ioni idrogeno (ossia protoni) sarebbero necessari per avere la carica positiva calcolata in (a)?

**42.** Nella **Figura 21.40** due palline uguali di massa identica  $m$  e carica identica  $q$  sono appese tramite fili isolanti di lunghezza  $L$ . Supponete che  $\theta$  sia così piccolo da poter sostituire  $\tan \theta$  con  $\sin \theta$ . (a) Mostrate che

$$x = \left( \frac{q^2 L}{2\pi\epsilon_0 mg} \right)^{\frac{1}{3}}$$

dà la distanza  $x$  tra le palline all'equilibrio. (b) Se  $L = 120$  cm,  $m = 10$  g e  $x = 5,0$  cm, quanto vale  $|q|$ ?



**Figura 21.40** Problemi 42 e 43.

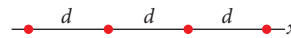
**43.** (a) Spiegate che cosa accade alle palline del problema 42 se una di esse viene scaricata (per esempio, se disperde la sua cari-

ca  $q$  a terra). (b) Calcolate la nuova distanza  $x$  tra le palline all'equilibrio, usando i valori dati di  $L$  e  $m$  e il valore calcolato di  $|q|$ .

**44.** **MS** A quale distanza devono trovarsi due protoni se il modulo della forza elettrostatica che agisce su ciascuno di essi per effetto dell'altro è uguale al modulo della forza gravitazionale che agisce su un protone sulla superficie terrestre?

**45.** Quanti megacoulomb di carica positiva ci sono in 1,00 mol di idrogeno gassoso molecolare neutro ( $H_2$ )?

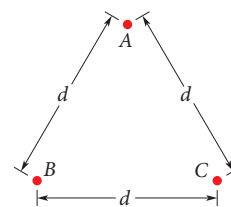
**46.** Nella **Figura 21.41** quattro particelle sono fisse lungo un asse  $x$ , separate da una distanza  $d = 2,00$  cm. Le loro cariche sono  $q_1 = +2e$ ,  $q_2 = -e$ ,  $q_3 = +e$  e  $q_4 = +4e$ , con  $e = 1,60 \cdot 10^{-19}$  C. Nella notazione con i versori, qual è la forza elettrostatica risultante che agisce (a) sulla particella 1 e (b) sulla particella 2 per effetto delle altre particelle?



**Figura 21.41** Problema 46.

**47.** Due cariche puntiformi di  $6,0 \mu C$  e  $-4,0 \mu C$  sono poste su un asse  $x$ , rispettivamente in  $x = 8,0$  m e in  $x = 16$  m. Quale carica deve essere posta in  $x = 24$  m affinché una qualunque carica posta nell'origine non risenta di alcuna forza elettrostatica?

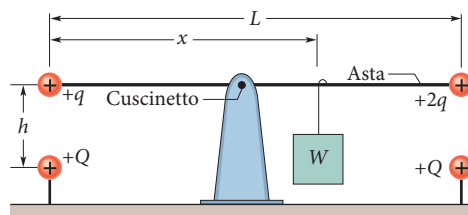
**48.** Nella **Figura 21.42** tre sfere conduttrici identiche formano un triangolo equilatero di lato  $d = 20,0$  cm. I raggi delle sfere sono molto più piccoli di  $d$  e le sfere hanno cariche  $q_A = -2,00$  nC,  $q_B = -4,00$  nC e  $q_C = +8,00$  nC. (a) Qual è il modulo della forza elettrostatica tra le sfere *A* e *C*? Si eseguono poi le seguenti operazioni: *A* e *B* sono collegate da un filo sottile e poi sono scollegate; *B* è messa a terra tramite il filo e poi il filo è rimosso; *B* e *C* sono collegate dal filo e poi scollegate. Quali sono ora i moduli delle forze elettrostatiche (b) tra le sfere *A* e *C* e (c) tra le sfere *B* e *C*?



**Figura 21.42** Problema 48.

**49.** Un neutrone è formato da un quark *up* con carica  $+2e/3$  e da due quark *down* ciascuno con carica  $-e/3$ . Se supponiamo che i quark *down* si trovino a una distanza di  $2,6 \cdot 10^{-15}$  m all'interno del neutrone, qual è il modulo della forza elettrostatica repulsiva tra di essi?

**50.** La **Figura 21.43** mostra una lunga asta isolante, priva di massa e avente lunghezza  $L$ , impernata al centro e tenuta in equilibrio tramite un blocco di peso  $W$  posto a una distanza  $x$  dalla sua estremità sinistra. Alle estremità sinistra e destra dell'asta sono attaccate due piccole sfere conduttrici con cariche positive rispettivamente  $q$  e  $2q$ . Sotto ciascuna di queste sfere, a una distanza  $h$ , sono fissate due sfere entrambe con carica positiva  $Q$ . (a) Trovate la distanza  $x$  quando l'asta è orizzontale e in equilibrio. (b) Quale valore dovrebbe avere  $h$  per far sì che l'asta non eserciti alcuna forza verticale sul cuscinetto quando è orizzontale e in equilibrio?



**Figura 21.43** Problema 50.

**51.** Un'asta isolante carica, che ha una lunghezza di 2,00 m e un'area della sezione trasversale di 4,00 cm<sup>2</sup>, giace lungo la semiasse positivo delle  $x$  con un'estremità nell'origine. La densità volumica di carica  $\rho$  è la carica per unità di volume ed è misurata in coulomb al metro cubo. Quanti elettroni in eccesso sono presenti nell'asta (a) se  $\rho$  è uniforme e ha un valore di  $-4,00 \mu\text{C}/\text{m}^3$  e (b) se  $\rho$  è non uniforme e ha un valore dato da  $\rho = bx^2$ , con  $b = -2,00 \mu\text{C}/\text{m}^5$ ?

**52.** Una particella di carica  $Q$  è fissa nell'origine di un sistema di coordinate  $xy$ . All'istante  $t = 0$  una particella ( $m = 0,800 \text{ g}$ ,  $q = 4,00 \mu\text{C}$ ) è posta sull'asse  $x$  in  $x = 20,0 \text{ cm}$ ; la particella si muove con una velocità di modulo 50,0 m/s nel verso positivo delle  $y$ . Per quale valore di  $Q$  la particella in movimento compirà un moto circolare? (Trascurate la forza di attrazione gravitazionale sulla particella.)

**53.** Quale sarebbe il modulo della forza elettrostatica tra due cariche puntiformi da 1,00 C separate da una distanza (a) di 1,00 m e (b) di 1,00 km se tali cariche puntiformi esistessero (non esistono) e questa configurazione potesse essere realizzata?

**54.** Una carica di 6,0  $\mu\text{C}$  deve essere divisa in due parti, che sono poi poste a una distanza di 3,0 mm. Qual è il massimo modulo possibile per la forza elettrostatica che agisce tra questi due parti?

**55.** Della carica  $Q$  presente su una piccola sfera una frazione  $\alpha$  deve essere trasferita a una seconda sfera vicina. Le sfere possono essere trattate come particelle. (a) Quale valore di  $\alpha$  rende massimo il modulo  $F$  della forza elettrostatica tra le due sfere? Quali sono (b) il valore più piccolo e (c) il valore più grande di  $\alpha$  che fa sì che  $F$  sia uguale alla metà del modulo massimo?

**56. BIO** Se un gatto si strofina ripetutamente contro i vostri pantaloni di cotone in una giornata secca, il trasferimento di carica tra il pelo del gatto e il cotone può lasciarvi con un eccesso di carica di  $-2,00 \mu\text{C}$ . (a) Quanti elettroni sono trasferiti tra voi e il gatto?

Perderete gradualmente la carica attraverso il pavimento, ma se invece di attendere vi sporgete immediatamente verso un rubinetto, una dolorosa scintilla può apparire improvvisamente quando avvicinate le dita al rubinetto. (b) In quella scintilla, gli elettroni scorrono da voi verso il rubinetto o viceversa? (c) Subito prima che appaia la scintilla, inducete cariche positive o negative nel rubinetto? (d) Se, invece, il gatto avvicina una zampa al rubinetto, in quale direzione scorrono gli elettroni nella scintilla risultante? (e) Se accarezzaste un gatto con una mano nuda in una giornata secca, dovrete fare attenzione a non portare le dita vicine al naso del gatto o gli fareste male con una scintilla. Considerando che il pelo del gatto è un isolante, spiegate come si genera questa scintilla.

**57.** Sappiamo che la carica negativa dell'elettrone e la carica positiva del protone sono uguali. Supponete, tuttavia, che i loro valori assoluti differiscano dello 0,00010%. Con quale forza si respingerebbero due monete di rame poste a 1,0 m di distanza? Supponete che ciascuna moneta contenga  $3 \cdot 10^{22}$  atomi di rame. (Suggerimento: un atomo di rame neutro contiene 29 protoni e 29 elettroni.) Che cosa concludete?

**58.** Nella Figura 21.27 la particella 1 di carica  $-80,0 \mu\text{C}$  e la particella 2 di carica  $+40,0 \mu\text{C}$  sono tenute a una distanza  $L = 20,0 \text{ cm}$  l'una dall'altra su un asse  $x$ . Nella notazione con i versori, qual è la forza elettrostatica risultante che agisce sulla particella 3, di carica  $q_3 = 20,0 \mu\text{C}$ , se questa è posta (a) in  $x = 40,0 \text{ cm}$  e (b) in  $x = 80,0 \text{ cm}$ ? Quali dovrebbero essere (c) la coordinata  $x$  e (d) la coordinata  $y$  della particella 3 se la forza elettrostatica risultante sulla particella 3 dovuta alle particelle 1 e 2 è zero?

**59.** Qual è la carica totale in coulomb di 75,0 kg di elettroni?

**60.** Nella Figura 21.44 sei particelle cariche circondano la particella 7 a distanze radiali  $d = 1,0 \text{ cm}$  o  $2d$ , come disegnato. Le cariche sono  $q_1 = +2e$ ,  $q_2 = +4e$ ,  $q_3 = +e$ ,  $q_4 = +4e$ ,  $q_5 = +2e$ ,  $q_6 = +8e$

e  $q_7 = +6e$ , con  $e = 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ . Qual è il modulo della forza elettrostatica risultante che agisce sulla particella 7?

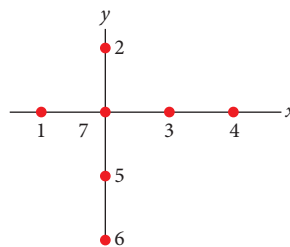


Figura 21.44 Problema 60.

**61.** Tre particelle cariche formano un triangolo: la particella 1 con carica  $Q_1 = 80,0 \text{ nC}$  è nel punto di coordinate  $xy$  date da  $(0; 3,00 \text{ mm})$ , la particella 2 con carica  $Q_2$  è in  $(0; -3,00 \text{ mm})$  e la particella 3 con carica  $q = 18,0 \text{ nC}$  è in  $(4,00 \text{ mm}; 0)$ . Nella notazione con i versori, qual è la forza elettrostatica sulla particella 3 dovuta alle altre due particelle se  $Q_2$  è uguale (a) a  $80,0 \text{ nC}$  e (b) a  $-80,0 \text{ nC}$ ?

**62. MS** Nella Figura 21.45 quali sono (a) il modulo e (b) la direzione e il verso della forza elettrostatica risultante che agisce sulla particella 4 per effetto delle altre tre particelle? Le quattro particelle sono fisse nel piano  $xy$  e  $q_1 = -3,20 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ,  $q_2 = +3,20 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ,  $q_3 = +6,40 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ,  $q_4 = +3,20 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ,  $\theta_1 = 35,0^\circ$ ,  $d_1 = 3,00 \text{ cm}$  e  $d_2 = d_3 = 2,00 \text{ cm}$ .

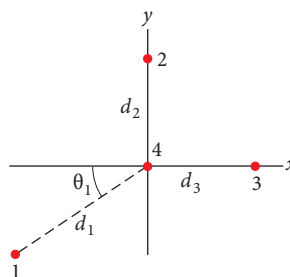


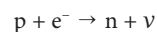
Figura 21.45 Problema 62.

**63. La carica di un penny.** Un penny americano ha una massa  $m = 3,11 \text{ g}$  e contiene un'uguale quantità di cariche positive e negative. Supponete che la moneta sia fatta interamente di rame (massa molare  $M = 63,5 \text{ g/mol}$ , numero atomico  $Z = 29$ ). (a) Qual è il modulo  $q$  di queste cariche? (b) Se le cariche potessero essere concentrate in due gruppi tenuti a 100 m di distanza l'uno dall'altro, quale sarebbe la forza di attrazione tra i due gruppi di cariche?

**64. Quark.** Qual è la composizione in quark (a) di un protone, (b) di un neutrone e (c) di un antiprotone? (I simboli possono essere in qualunque ordine.) (d) Quando un nucleone subisce un decadimento  $\beta^-$  (vedete il problema 67), qual è il cambiamento nella composizione in quark?

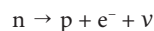
**65. Forza elettrostatica e forza gravitazionale.** La distanza media  $r$  tra l'elettrone e il protone centrale nell'atomo di idrogeno è  $5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m}$ . Quali sono i moduli (a) della forza elettrostatica e (b) della forza gravitazionale che agiscono tra le particelle? (c) La seconda può essere responsabile del mantenere assieme l'atomo?

**66. BIO Cattura elettronica nella terapia dei tumori.** Alcuni radionuclidi possono decadere per cattura elettronica,



e poi i nuclei figli possono rilasciare elettroni di Auger-Meitner. Se i radionuclidi sono posti vicino a cellule tumorali, gli elettroni emessi possono danneggiare in modo letale tali cellule. Qual è l'atomo figlio se l'atomo padre è (a) iodio  $^{123}_{53}\text{I}$ , (b) iodio  $^{125}_{53}\text{I}$  e (c) gallio  $^{67}_{31}\text{Ga}$ ?

**67. BIO Decadimento  $\beta^-$  nella terapia del cancro.** Alcuni radionuclidi possono subire un decadimento  $\beta^-$ , nel quale un neutrone si trasforma in un protone (che rimane nel nucleo) e rilascia un elettrone e un neutrino:



Se i radionuclidi sono posti vicino a un tumore, gli elettroni emessi possono danneggiare in modo letale il tumore. Qual è l'atomo figlio se l'atomo padre è (a) iodio  $^{131}_{53}\text{I}$ , (b) rame  $^{67}_{29}\text{Cu}$  e (c) ittrio  $^{90}_{39}\text{Y}$ ? I primi due sono usati per tumori piccoli, il terzo per tumori più grandi.

**68. Rilevatori di fumo.** Molti rilevatori di fumo domestici (Figura 21.46) contengono americio-241 radioattivo  $^{241}_{95}\text{Am}$ , che è un emettitore di particelle alfa. Le particelle alfa ionizzano l'aria (strappano elettroni alle molecole dell'aria) tra due lastre cariche. Gli elettroni liberati scorrono poi verso la lastra carica positivamente. C'è quindi una corrente elettrica che scorre tra le due lastre. Se delle particelle di fumo entrano nell'aria, riducono la corrente, che fa scattare l'allarme. Qual è il nucleo figlio prodotto dal decadimento alfa?



Figura 21.46 Problema 68.

**69. BIO Decadimento alfa nella terapia del cancro.** Alcuni radionuclidi decadono emettendo una particella alfa. Per curare il cancro delle ossa un emettitore di particelle alfa come il radio  $^{223}_{88}\text{Ra}$  è attaccato a una molecola vettore che viene poi assorbita dall'osso come se fosse calcio. Qual è l'atomo figlio se l'atomo padre è (a) radio  $^{223}_{88}\text{Ra}$ , (b) radio  $^{226}_{88}\text{Ra}$  e (c) attinio  $^{225}_{89}\text{Ac}$ ?

**70. BIO Decadimento competitivo nella diagnosi del cancro.** Alcuni radionuclidi possono subire un decadimento  $\beta^+$  o una cattura elettronica. Qual è l'atomo figlio risultante quando il carbonio  $^{11}_6\text{C}$  subisce (a) un decadimento  $\beta^+$  e (b) una cattura elettronica? Qual è l'atomo figlio quando  $^{18}_9\text{F}$  subisce (c) un decadimento  $\beta^+$  e (d) una cattura elettronica?

**71. Fissione dell'uranio.** Se un neutrone lento è catturato da un nucleo di uranio-235 (un grosso nucleo), questo può fissionare (dividersi) in due nuclei di dimensione intermedia e rilasciare due o tre neutroni. Questa è una possibilità:



Quali numeri vanno al posto dell'apice (a) e del pedice (b) e quale simbolo chimico va nella posizione (c)? (d) I nuclei di dimensione intermedia hanno troppi neutroni per essere stabili e quindi decadono tramite decadimenti  $\beta^-$ , in cui un neutrone diventa un protone e il nucleo emette un elettrone e un neutrino (che non ha carica). Vedete il problema 67. Quale nucleo figlio risulta dal decadimento di  $^{144}_{56}\text{Ba}$ ?

**72. BIO Gamma-camera.** Per ottenere delle immagini degli organi interni di un paziente, viene iniettata una sostanza che contiene molibdeno radioattivo  $^{99}_{42}\text{Mo}$ , che decade in tecnezio  $^{99}_{43}\text{Tc}$ , e poi il paziente viene fatto entrare in una gamma-camera (Figura 21.47). Il tecnezio è prodotto in uno stato ad alta energia, ma mentre è nella gamma-camera riduce la propria energia emettendo un raggio gamma. Il paziente è parzialmente circondato da una serie di rivelatori di raggi gamma che funzionano per lo più come una normale fotocamera che cattura un'immagine con la luce visibile. Il sistema di rivelazione produce un'immagine del paziente che mostra i siti di emissione dei raggi gamma. (I radionuclidi che emettono elettroni, positroni o particelle alfa non sono utili per l'imaging dei tessuti profondi, perché queste particelle viaggiano solo per brevi distanze attraverso il corpo, mentre i raggi gamma possono sfuggire e raggiungere i rivelatori.) Nel decadimento del  $^{99}_{42}\text{Mo}$  in  $^{99}_{43}\text{Tc}$ , quale particella è emessa oltre al neutrino?



Figura 21.47 Problema 72.

Jearl Walker

# Halliday - Resnick Fondamenti di fisica

Meccanica • Onde • Termodinamica  
Elettromagnetismo • Ottica

Ottava edizione italiana condotta  
sull'undicesima edizione americana

Inquadra  
e scopri  
i contenuti



## Le risorse multimediali

[online.universita.zanichelli.it/halliday-fond8e](https://online.universita.zanichelli.it/halliday-fond8e)

A questo indirizzo sono disponibili le risorse multimediali di complemento al libro.

Per accedere alle risorse protette è necessario registrarsi su [my.zanichelli.it](https://my.zanichelli.it) inserendo il codice di attivazione personale contenuto nel libro.

## Libro con Ebook

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

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.

Nel 2002 l'American Physical Society ha insignito *Fondamenti di fisica* di Halliday, Resnick e Walker del titolo di miglior introduzione alla fisica generale del XX secolo, un tributo al suo impatto duraturo sulla formazione di generazioni di studenti e studentesse. *Fondamenti di fisica* si distingue per la trattazione rigorosa dei concetti di base nello stile chiaro e coinvolgente della migliore tradizione didattica americana.

Gli argomenti sono esposti in modo intuitivo, arricchiti da numerosi esempi di fisica applicata a discipline diverse e tratti dalle ricerche scientifiche più recenti. Questa combinazione rende lo studio dei concetti fisici avvincente e immediatamente applicabile.

Ciascun paragrafo si apre con un elenco per punti delle *idee chiave*; lungo il testo sono proposte *verifiche* (con soluzione online) e *problemi svolti* passo a passo, e le regole fondanti sono messe ben in evidenza per favorire la comprensione; i capitoli si concludono con una *sintesi* degli argomenti, *domande* di revisione, *problemi* di difficoltà diversa (alcuni con applicazioni biomediche) e *problemi di riepilogo* con soluzioni online. Questa edizione si distingue per un marcato interesse verso l'applicazione della fisica al corpo umano.

Jearl Walker, che porta avanti l'aggiornamento dell'opera, ha analizzato infatti migliaia di articoli provenienti anche dalla ricerca in medicina, neuroscienze, ingegneria per illustrare come la fisica abbia a che fare direttamente con la nostra salute. L'autore esamina, tra gli altri, argomenti come le terapie con neutroni veloci per la cura dei tumori, la chirurgia robotica, la stimolazione magnetica transcranica per trattare disturbi neurologici e la magnetoencefalografia per lo studio delle funzioni cerebrali.

Una raccolta di domande interattive a scelta multipla, scritte appositamente per l'ottava edizione italiana, è disponibile online.

**David Halliday** (1916-2010) e **Robert Resnick** (1923-2014) sono stati due fisici americani che hanno rivoluzionato, con i loro libri, l'insegnamento della Fisica. Professori e autori, sono noti soprattutto per i libri di testo *Physics* e *Fundamentals of Physics*, tradotti in più di 47 lingue ed entrambi presenti nel catalogo CEA (Halliday, Resnick, Krane *Fisica* quinta edizione, 2003; e Halliday, Resnick, Krane *Fondamenti di fisica* ottava edizione, 2023).

**Jearl Walker** è professore di Fisica alla Cleveland State University e divulgatore scientifico. È autore anche di *The Flying Circus of Physics* che risponde a 740 domande sulla fisica nella vita di tutti i giorni.

HALLIDAY\*FONDAM FISICA 8ED (CEA LUMKQ)

ISBN 978-88-08-89977-4



9 788808 899774

5 6 7 8 9 0 1 2 3 (64D)