

SERWAY • JEWETT

Quinta edizione

# Principi di Fisica





 QUINTA EDIZIONE

# Principi di Fisica



**Raymond A. Serway**

*Emeritus, James Madison University*

**John W. Jewett, Jr.**

*Emeritus, California State Polytechnic University, Pomona*

*Titolo originale:*

Raymond A. Serway and John W. Jewett, Jr.  
Principles of Physics: A Calculus - Based Text  
5th Edition, International Edition  
Copyright © 2013 Brooks/Cole, Cengage Learning

Principi di Fisica - V edizione  
Copyright © 2015, EdiSES s.r.l. - Napoli

9 8 7 6 5 4 3 2 1 0  
2019 2018 2017 2016 2015

Le cifre sulla destra indicano il numero e l'anno dell'ultima ristampa effettuata

*A norma di legge è vietata la riproduzione, anche parziale,  
del presente volume o di parte di esso con qualsiasi mezzo.*

L'Editore

*Stampato presso*

Petrucci S.r.l.

Via Venturelli, 7/B - Città di Castello (PG)

*per conto della*

EdiSES - Piazza Dante, 89 - Napoli

www.edises.it  
info@edises.it

ISBN 978 88 7959 8644

# Indice

|   |      |
|---|------|
| Prefazione  | IX   |
| Per gli studenti  | XIX  |
| Elenco delle applicazioni e dei problemi riguardanti le Scienze della Vita                  | XXII |
| <b>Invito alla fisica</b>   | 1    |
| <b>1 Introduzione e vettori</b>   | 4    |
| 1.1 Campioni di lunghezza, massa e tempo  | 4    |
| 1.2 Analisi dimensionale  | 7    |
| 1.3 Conversione delle unità   | 8    |
| 1.4 Calcoli di ordini di grandezza  | 9    |
| 1.5 Cifre significative   | 10   |
| 1.6 Sistemi di coordinate   | 12   |
| 1.7 Vettori e scalari   | 13   |
| 1.8 Alcune proprietà dei vettori  | 15   |
| 1.9 Componenti di un vettore e versori  | 17   |
| 1.10 Modellistica, rappresentazioni alternative e strategia per la risoluzione dei problemi | 22   |
| Contesto 1   Veicoli con combustibili alternativi   | 35   |
| <b>2 Moto in una dimensione</b>   | 37   |
| 2.1 Velocità media  | 38   |
| 2.2 Velocità istantanea   | 41   |
| 2.3 Modello di analisi: particella con velocità costante                                    | 45   |
| 2.4 Accelerazione   | 47   |
| 2.5 Diagrammi del moto  | 50   |
| 2.6 Modello di analisi: particella con accelerazione costante                               | 51   |
| 2.7 Corpi in caduta libera  | 56   |
| 2.8 Collegamento al contesto: accelerazione richiesta dai consumatori                       | 59   |
| <b>3 Moto in due dimensioni</b>   | 69   |
| 3.1 Vettori di posizione, velocità e accelerazione  | 69   |
| 3.2 Moto in due dimensioni con accelerazione costante                                       | 71   |
| 3.3 Moto del proiettile   | 74   |
| 3.4 Modello di analisi: particella in moto circolare uniforme                               | 81   |
| 3.5 Accelerazione tangenziale e radiale   | 83   |
| 3.6 Velocità relativa e accelerazione relativa  | 84   |
| 3.7 Collegamento al contesto: accelerazione laterale delle automobili                       | 87   |
| <b>4 Le leggi del moto</b>  | 97   |
| 4.1 Il concetto di forza  | 97   |
| 4.2 La prima legge di Newton  | 99   |
| 4.3 Massa   | 100  |
| 4.4 La seconda legge di Newton  | 101  |
| 4.5 La forza gravitazionale e il peso   | 104  |
| 4.6 La terza legge di Newton  | 105  |
| 4.7 Applicazioni delle leggi di Newton  | 107  |
| 4.8 Collegamento al contesto: forze su automobili   | 115  |

## 5 Altre applicazioni delle leggi di Newton 125

|   |     |
|---|-----|
| 5.1 Forze di attrito  | 125 |
| 5.2 Estensione del modello per una particella in moto circolare uniforme  | 130 |
| 5.3 Moto circolare non uniforme   | 136 |
| 5.4 Moto in presenza di forze d'attrito dipendenti dalla velocità         | 138 |
| 5.5 Le forze fondamentali della natura                                    | 142 |
| 5.6 Collegamento al contesto: coefficienti di resistenza delle automobili | 144 |

## 6 Energia di un sistema 154

|   |     |
|---|-----|
| 6.1 Sistemi e ambienti  | 155 |
| 6.2 Lavoro svolto da una forza costante                         | 156 |
| 6.3 Prodotto scalare di due vettori                             | 158 |
| 6.4 Lavoro svolto da una forza variabile                        | 160 |
| 6.5 Energia cinetica e teorema dell'energia cinetica            | 165 |
| 6.6 Energia potenziale di un sistema                            | 168 |
| 6.7 Forze conservative e non conservative                       | 173 |
| 6.8 Relazione tra forze conservative ed energia potenziale      | 175 |
| 6.9 Energia potenziale per le forze gravitazionale ed elettrica | 176 |
| 6.10 Diagrammi di energia ed equilibrio di un sistema           | 179 |
| 6.11 Connessione al contesto: energia potenziale nei carburanti | 181 |

## 7 Conservazione dell'energia 192

|   |     |
|---|-----|
| 7.1 Modello di analisi: sistema non isolato (energia)                         | 193 |
| 7.2 Modello di analisi: sistema isolato (energia)                             | 195 |
| 7.3 Modello di analisi: sistema non isolato nello stato stazionario (energia) | 202 |
| 7.4 Situazioni con attrito dinamico   | 203 |
| 7.5 Variazioni di energia meccanica dovute a forze non conservative           | 208 |
| 7.6 Potenza   | 214 |
| 7.7 Collegamento al contesto: valutazione della potenza delle automobili      | 216 |

Contesto 1 | CONCLUSIONI  
Possibilità presenti e future 230

Contesto 2 | Missione su Marte 233

## 8 Quantità di moto ed urti 235

|  |     |
|--|-----|
| 8.1 Quantità di moto   | 235 |
| 8.2 Modello di analisi: sistema isolato (quantità di moto)     | 237 |
| 8.3 Modello di analisi: sistema non isolato (quantità di moto) | 240 |
| 8.4 Urto in una dimensione                                     | 243 |
| 8.5 Urto in due dimensioni                                     | 250 |
| 8.6 Il centro di massa   | 253 |
| 8.7 Moto di un sistema di particelle                           | 257 |
| 8.8 Collegamento al contesto: propulsione di un razzo          | 260 |

**9 Relatività** 272

- 9.1** Il principio di relatività galileiana 273  
**9.2** L'esperimento di Michelson-Morley 275  
**9.3** Il principio di relatività di Einstein 276  
**9.4** Conseguenze della relatività ristretta 276  
**9.5** Le trasformazioni di Lorentz 285  
**9.6** Quantità di moto relativistica delle leggi di Newton 288  
**9.7** Energia relativistica 290  
**9.8** Massa ed energia 292  
**9.9** Relatività generale 293  
**9.10** Collegamento al contesto: da Marte alle stelle 296

**10 Moto rotazionale** 305

- 10.1** Posizione, velocità e accelerazione angolare 306  
**10.2** Modello di analisi: corpo rigido soggetto ad accelerazione angolare costante 308  
**10.3** Relazioni fra grandezze rotazionali e traslazionali 310  
**10.4** Energia cinetica rotazionale 311  
**10.5** Momento di una forza e prodotto vettoriale 316  
**10.6** Modello di analisi: corpo rigido in equilibrio 320  
**10.7** Modello di analisi: corpo rigido sottoposto a momento risultante delle forze 323  
**10.8** Considerazioni energetiche nel moto rotazionale 326  
**10.9** Modello di analisi: momento angolare nei sistemi non isolati 328  
**10.10** Modello di analisi: momento angolare nei sistemi isolati 331  
**10.11** Moto di precessione dei giroscopi 335  
**10.12** Rotolamento dei corpi rigidi 336  
**10.13** Collegamento al contesto: ruotare l'astronave 339

**11 La gravità, le orbite planetarie e l'atomo di idrogeno** 354

- 11.1** Rivedizione della legge di Newton della gravitazione universale 355  
**11.2** Modelli strutturali 357  
**11.3** Le leggi di Keplero 358  
**11.4** Considerazioni energetiche sul moto dei pianeti e dei satelliti 364  
**11.5** Spettri atomici e teoria di Bohr dell'atomo di idrogeno 368  
**11.6** Collegamento al contesto: passare da un'orbita circolare ad una ellittica 374

Contesto 2 | CONCLUSIONI  
Pianificazione di una missione di successo 384

Contesto 3 | Terremoti 388

**12 Moto oscillatorio** 390

- 12.1** Moto di un corpo collegato a una molla 391  
**12.2** Modello di analisi: particella in moto armonico semplice 392  
**12.3** Energia di un oscillatore armonico semplice 397  
**12.4** Il pendolo semplice 400  
**12.5** Il pendolo fisico 402  
**12.6** Oscillazioni smorzate 403  
**12.7** Oscillazioni forzate 404  
**12.8** Collegamento al contesto: risonanza nelle strutture 405

**13 Onde meccaniche** 415

- 13.1** Propagazione di una perturbazione 416  
**13.2** Modello di analisi: l'onda che si propaga 418  
**13.3** La velocità delle onde trasversali nelle corde 423  
**13.4** Riflessione a trasmissione delle onde 426  
**13.5** Potenza trasmessa dalle onde sinusoidali nelle corde 427  
**13.6** Onde acustiche 429  
**13.7** L'effetto Doppler 432  
**13.8** Collegamento al contesto: le onde sismiche 435

**14 Sovrapposizione e onde stazionarie** 447

- 14.1** Modello di analisi: interferenza tra onde 448  
**14.2** Onde stazionarie 451  
**14.3** Modello di analisi: onde sottoposte a condizioni al contorno 454  
**14.4** Onde stazionarie nelle colonne d'aria 456  
**14.5** Battimenti: interferenza temporale 460  
**14.6** Configurazioni d'onda non sinusoidali 462  
**14.7** Orecchio e teorie di percezione del tono BIO 464  
**14.8** Collegamento al contesto: costruzione sui ventri 466

Contesto 3 | CONCLUSIONI  
Minimizzare il rischio 476

Contesto 4 | Attacchi di cuore BIO 479

**15 Meccanica dei fluidi** 482

- 15.1** Pressione 482  
**15.2** Variazione della pressione con la profondità 484  
**15.3** Misure di pressione 488  
**15.4** Forze di galleggiamento e principio di Archimede 488  
**15.5** Dinamica dei fluidi 493  
**15.6** Linee di corrente ed equazione di continuità dei fluidi 493  
**15.7** Teorema di Bernoulli 495  
**15.8** Altre applicazioni di dinamica dei fluidi 498  
**15.9** Collegamento al contesto: flusso turbolento del sangue BIO 499

Contesto 4 | CONCLUSIONI  
Individuazione dell'aterosclerosi e prevenzione degli attacchi di cuore BIO 509

Contesto 5 | Il riscaldamento globale 513

**16 Temperatura e teoria cinetica dei gas** 515

- 16.1** Temperatura e principio zero della termodinamica 516  
**16.2** I termometri e le scale di temperatura 517  
**16.3** Dilatazione termica di solidi e liquidi 520  
**16.4** Descrizione macroscopica di un gas perfetto 525  
**16.5** La teoria cinetica dei gas 527  
**16.6** Distribuzione delle velocità molecolari 533  
**16.7** Collegamento al contesto: il gradiente verticale di temperatura nell'atmosfera 535

|   |     |
|---|-----|
| <b>17 Energia nelle trasformazioni termodinamiche: il primo principio della termodinamica</b> | 545 |
| 17.1 Calore ed energia interna  | 546 |
| 17.2 Calore specifico   | 548 |
| 17.3 Calore latente   | 550 |
| 17.4 Lavoro nelle trasformazioni termodinamiche   | 554 |
| 17.5 Il primo principio della termodinamica   | 557 |
| 17.6 Alcune applicazioni del primo principio della termodinamica                              | 559 |
| 17.7 Calori specifici molari dei gas perfetti   | 562 |
| 17.8 Trasformazioni adiabatiche per un gas perfetto   | 564 |
| 17.9 Calori specifici molari ed equipartizione dell'energia                                   | 566 |
| 17.10 Meccanismi di trasferimento di energia nei processi termici                             | 568 |
| 17.11 Collegamento al contesto: bilancio energetico per la Terra                              | 573 |
| <b>18 Macchine termiche, entropia e secondo principio della termodinamica</b>                 | 586 |
| 18.1 Macchine termiche e secondo principio della termodinamica                                | 587 |
| 18.2 Trasformazioni reversibili e irreversibili   | 589 |
| 18.3 La macchina di Carnot  | 589 |
| 18.4 Pompe di calore e frigoriferi  | 592 |
| 18.5 Un enunciato alternativo del secondo principio   | 593 |
| 18.6 Entropia   | 594 |
| 18.7 Entropia e secondo principio della termodinamica   | 597 |
| 18.8 Variazioni di entropia nelle trasformazioni irreversibili                                | 599 |
| 18.9 Collegamento al contesto: l'atmosfera come macchina termica                              | 602 |
| Contesto 5   CONCLUSIONI  |     |
| Stima della temperatura sulla superficie della Terra  | 612 |
| Contesto 6   Fulmini  | 617 |
| <b>19 Forze elettriche e campi elettrici</b>  | 619 |
| 19.1 Cenni storici  | 620 |
| 19.2 Proprietà delle cariche elettriche   | 620 |
| 19.3 Isolanti e conduttori  | 622 |
| 19.4 La legge di Coulomb  | 624 |
| 19.5 Campi elettrici  | 627 |
| 19.6 Linee di campo elettrico   | 633 |
| 19.7 Moto di particelle caricate in un campo elettrico uniforme                               | 634 |
| 19.8 Flusso elettrico   | 636 |
| 19.9 Il teorema di Gauss  | 639 |
| 19.10 Applicazioni del teorema di Gauss a distribuzioni simmetriche di cariche                | 641 |
| 19.11 Conduttori in equilibrio elettrostatico   | 644 |
| 19.12 Collegamento al contesto: il campo elettrico atmosferico                                | 645 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>20 Potenziale elettrico e capacità</b>  | 656 |
| 20.1 Potenziale elettrico e differenza di potenziale   | 657 |
| 20.2 Differenza di potenziale in un campo elettrico uniforme   | 658 |
| 20.3 Potenziale elettrico ed energia potenziale elettrica di cariche puntiformi  | 661 |
| 20.4 Ricavare il valore del campo elettrico dal potenziale elettrico   | 664 |
| 20.5 Potenziale elettrico dovuto a distribuzioni continue di carica  | 666 |
| 20.6 Potenziale elettrico di un conduttore carico  | 669 |
| 20.7 La capacità   | 671 |
| 20.8 Collegamento di condensatori  | 674 |
| 20.9 Energia immagazzinata in un condensatore carico   | 678 |
| 20.10 Condensatori con dielettrici   | 681 |
| 20.11 Collegamento al contesto: l'atmosfera come condensatore  | 685 |
| <b>21 Corrente e circuiti a corrente continua</b>  | 697 |
| 21.1 La corrente elettrica   | 698 |
| 21.2 Resistenza e legge di Ohm   | 701 |
| 21.3 Superconduttori   | 706 |
| 21.4 Un modello per la conduzione elettrica  | 707 |
| 21.5 Energia e potenza nei circuiti elettrici  | 710 |
| 21.6 Sorgenti di f.e.m.  | 713 |
| 21.7 Resistori in serie e in parallelo   | 715 |
| 21.8 Leggi di Kirchhoff  | 721 |
| 21.9 Circuiti RC   | 724 |
| 21.10 Collegamento al contesto: l'atmosfera come conduttore  | 729 |
| Contesto 6   CONCLUSIONI   |     |
| Determinazione del numero di fulmini che colpiscono la Terra   | 739 |
| Contesto 7   Magnetismo in medicina BIO  | 741 |
| <b>22 Forze e campi magnetici</b>  | 743 |
| 22.1 Introduzione storica  | 744 |
| 22.2 Il campo magnetico  | 745 |
| 22.3 Moto di una particella carica in un campo magnetico uniforme  | 748 |
| 22.4 Applicazioni del moto di particelle cariche in un campo magnetico   | 751 |
| 22.5 Forza magnetica su un conduttore percorso da corrente   | 754 |
| 22.6 Momento delle forze agenti su una spira in un campo magnetico uniforme  | 756 |
| 22.7 La legge di Biot-Savart   | 758 |
| 22.8 Forza magnetica fra due conduttori paralleli  | 761 |
| 22.9 Teorema di Ampère   | 762 |
| 22.10 Il campo magnetico di un solenoide   | 766 |
| 22.11 Magnetismo nella materia   | 767 |
| 22.12 Collegamento al contesto: Navigazione magnetica a distanza per operazioni di ablazione cardiaca con catetere BIO | 769 |

**23 Legge di Faraday e induttanza** 781

- 23.1** Legge di Faraday dell'induzione 781  
**23.2** Forza elettromotrice dinamica 786  
**23.3** Legge di Lenz 791  
**23.4** Forze elettromotrici indotte e campi elettrici 794  
**23.5** Autoinduzione 796  
**23.6** Circuiti  $RL$  798  
**23.7** Energia immagazzinata in un campo magnetico 801  
**23.8** Collegamento al contesto: l'uso della stimolazione magnetica transcranica nella depressione **BIO** 804

Contesto **7** | CONCLUSIONIRisonanza magnetica nucleare e imaging a risonanza magnetica **BIO** 817Contesto **8** | Laser 820**24 Onde elettromagnetiche** 822

- 24.1** Corrente di spostamento e teorema di Ampère generalizzato 823  
**24.2** Le equazioni di Maxwell e le scoperte di Hertz 824  
**24.3** Le onde elettromagnetiche 826  
**24.4** Energia trasportata dalle onde elettromagnetiche 830  
**24.5** Quantità di moto e pressione di radiazione 833  
**24.6** Lo spettro delle onde elettromagnetiche 836  
**24.7** Polarizzazione della luce 837  
**24.8** Collegamento al contesto: le particolari proprietà della luce laser 839

**25 Riflessione e rifrazione della luce** 852

- 25.1** La natura della luce 852  
**25.2** Il modello di raggio luminoso in ottica geometrica 853  
**25.3** Modello di analisi: riflessione di un'onda 854  
**25.4** Modello di analisi: rifrazione di un'onda 857  
**25.5** Dispersione e prismi 862  
**25.6** Il principio di Huygens 863  
**25.7** Riflessione interna totale 865  
**25.8** Collegamento al contesto: le fibre ottiche 867

**26 Formazione dell'immagine da specchi e lenti** 879

- 26.1** Immagini formate da specchi piani 879  
**26.2** Immagini formate da specchi sferici 882

- 26.3** Immagini formate per rifrazione 888  
**26.4** Lenti sottili 891  
**26.5** L'occhio **BIO** 898  
**26.6** Collegamento al contesto: alcune applicazioni mediche **BIO** 900

**27 Ottica ondulatoria** 910

- 27.1** Condizioni per l'interferenza 911  
**27.2** L'esperimento della doppia fenditura di Young 911  
**27.3** Modello di analisi: l'interferenza delle onde 913  
**27.4** Cambiamento di fase dovuto alla riflessione 916  
**27.5** Interferenza nelle lamine sottili 916  
**27.6** Figure di diffrazione 919  
**27.7** Risoluzione della singola fenditura e di aperture circolari 922  
**27.8** Il reticolo di diffrazione 925  
**27.9** Diffrazione di raggi X da cristalli 927  
**27.10** Collegamento al contesto: olografia 928

Contesto **8** | CONCLUSIONI

Usare i laser per immagazzinare e leggere informazioni digitali 939

**Appendice A Tabelle** A.1

- A.1 Fattori di conversione A.1  
A.2 Simboli, dimensioni e unità delle grandezze fisiche A.2  
A.3 Informazioni chimiche e nucleari di alcuni isotopi A.4

**Appendice B Richiami di analisi matematica** A.6

- B.1 Notazione scientifica A.6  
B.2 Algebra A.7  
B.3 Geometria A.12  
B.4 Trigonometria A.13  
B.5 Sviluppo in serie A.15  
B.6 Calcolo differenziale A.15  
B.7 Calcolo integrale A.18  
B.8 Propagazione degli errori A.22

**Appendice C Tavola periodica degli elementi** A.24**Appendice D Unità SI** A.26

- D.1 Unità SI fondamentali A.26  
D.2 Unità SI derivate A.26

**Risposte ai problemi con numero dispari** A.27**Indice analitico** I.1

# Curatori dell'edizione italiana

## Traduzione a cura di:

**Carlo Maria Carbonaro** - Università degli Studi di Cagliari

**Giovanni De Lellis** - Università degli Studi di Napoli "Federico II"

**Angelo Galante** - Università degli Studi dell'Aquila

**Giuseppe Gorini** - Università degli Studi di Milano-Bicocca

**Simonetta Marcello** - Università degli Studi di Torino

**Massimo Moraldi** - Università degli Studi di Firenze

**Tiziano Rovelli** - Università degli Studi di Bologna

**Roberto Stroili** - Università degli Studi di Padova

**Lorenzo Torrisi** - Università degli Studi di Messina

**Cristiano Viappiani** - Università degli Studi di Parma

## Revisione a cura di:

**Vittorio Cataudella** - Università degli Studi di Napoli "Federico II"

# Autori



**Raymond A. Serway** ha ricevuto il suo dottorato all'Illinois Institute of Technology ed è attualmente Professore Emerito alla James Madison University. Nel 2011, è stato insignito di un titolo di dottorato onorario dalla sua *alma mater*, lo Utica College. Nel 1990, la James Madison University, dove avrebbe insegnato per 17 anni, gli aveva conferito il Madison Scholar Award. Cominciò la sua carriera di insegnante alla Clarkson University, dove condusse attività di ricerca ed insegnò dal 1967 al 1980. Nel 1977, ricevette il Distinguished Teaching Award dalla Clarkson University e lo Alumni Achievement Award dall'Utica College nel 1985. È stato Guest Scientist allo IBM Research Laboratory a Zurigo, in Svizzera, dove ha lavorato con K. Alex Müller, premio Nobel nel 1987. Il Dr. Serway è stato anche scienziato ospite all'Argonne National Laboratory, dove ha collaborato con il suo maestro ed amico Sam Marshall. È coautore, oltre che delle precedenti edizioni di questo testo, di *College Physics*, nona edizione, *Fisica per Scienze ed Ingegneria*, quinta edizione, *Essentials of College Physics*, *Modern Physics*, terza edizione, e del testo *Physics* per le scuole superiori, pubblicato da Holt McDougal. Il Dr. Serway ha pubblicato più di 40 articoli scientifici nel campo della fisica dei mezzi condensati ed ha svolto più di 60 presentazioni a convegni scientifici. Il Dr. Serway e sua moglie Elizabeth amano viaggiare, giocare a golf e trascorrere il loro tempo libero con i loro quattro figli, dieci nipoti e un pronipote.



**John W. Jewett, Jr.** ha conseguito la laurea in Fisica alla Drexel University e il dottorato all'Ohio State University, specializzandosi in ottica e proprietà magnetiche della materia condensata. Ha iniziato la sua carriera accademica presso il Richard Stockton College nel New Jersey, dove ha insegnato dal 1974 al 1984. È attualmente Professore di Fisica alla California State Polytechnic University, Pomona. Attraverso tutta la sua carriera di insegnante, il Dr. Jewett si è particolarmente impegnato a dare impulso all'istruzione scientifica. Oltre a ricevere quattro finanziamenti dalla National Science Foundation, ha contribuito a fondare e dirigere il Southern California Area Modern Physics Institute (SCAMPI) e il Science IMPACT (Institute for Modern Pedagogy and Creative Teaching). Fra i riconoscimenti ricevuti dal Dr. Jewett vanno citati lo Stockton Merit Award del Richard Stockton College nel 1980, l'Outstanding Professor Award della California State Polytechnic University per il 1991-1992 e, nel 1998, l'Excellence in Undergraduate Physics Teaching Award dalla American Association of Physics Teachers (AAPT). Nel 2010, è stato insignito dell'Alumni Lifetime Achievement Award dalla Drexel University in riconoscimento del suo contributo all'insegnamento della fisica. Ha tenuto più di 100 presentazioni in conferenze scientifiche nazionali ed internazionali dell'AAPT. Ha pubblicato 25 articoli di ricerca in fisica della materia condensata e ricerca sull'insegnamento della fisica. È autore di *The World of Physics: Mysteries, Magic, and Myth*, che fornisce numerose correlazioni tra la fisica e le esperienze quotidiane. Oltre ad essere coautore di questo libro di testo, è anche coautore di *Fisica per Scienze ed Ingegneria*, quinta edizione, e di *Global Issues*, un'opera in quattro volumi di manuali di istruzioni per la scienza integrata per le scuole superiori. Il Dr. Jewett si diletta a suonare la tastiera nella sua band di soli fisici, a viaggiare, a fare foto subacquee, a imparare le lingue e a collezionare oggetti antichi che possano servire per dimostrazioni di fisica nelle lezioni. Trascorre il suo tempo libero con la moglie Lisa, i figli ed i nipotini.

# Prefazione

*Principi di Fisica* è progettato per un corso annuale introduttivo di Fisica basato sul calcolo, per studenti delle facoltà di Scienze e Medicina. Questa quinta edizione contiene molte novità didattiche tra le quali una strategia per la risoluzione dei problemi che utilizza un approccio modellistico. Sulla base dei commenti sulla quarta edizione da parte degli studenti, e dei suggerimenti dei revisori, è stato attuato uno sforzo maggiore per migliorare l'organizzazione, la chiarezza dell'esposizione, la precisione del linguaggio e l'accuratezza dell'insieme.

Questo libro di testo è stato inizialmente concepito a seguito dei problemi ben noti riguardanti l'insegnamento di un corso introduttivo di fisica basato sul calcolo. Il contenuto del corso (così come la dimensione dei testi) continua a crescere, mentre il numero di ore di interazione con gli studenti diminuisce o rimane invariato [nei nostri corsi triennali cade drammaticamente *N.d.T.*] Inoltre, il corso tradizionale di un anno copre appena, quando la copre, la Fisica del XIX secolo.

Nel preparare questo testo, siamo stati influenzati dalla diffusione dell'interesse nel riformulare l'insegnamento e l'apprendimento della Fisica, specialmente dagli sforzi compiuti attraverso l'“Introductory University Physics Project” (IUPP, Progetto di Fisica Introduttiva per l'Università), promosso dalla Associazione Americana Insegnanti di Fisica e dall'Istituto Americano di Fisica. Gli scopi principali e le linee guida di questo progetto sono:

- Ridurre il contenuto del corso, seguendo il tema “meno può essere meglio”;
- Inserire in modo naturale la Fisica contemporanea nel corso;
- Organizzare il corso nel contesto di uno o più “filoni storici”;
- Trattare tutto ciò che riguarda gli studenti ragionevolmente.

Riconoscendo la necessità di un testo che esprimesse queste linee guida già diversi anni fa, abbiamo studiato i vari modelli IUPP proposti e i diversi rapporti delle commissioni IUPP. In seguito, uno di noi (RAS) fu attivamente coinvolto nella revisione e nella pianificazione di un modello specifico, inizialmente sviluppato dall'Accademia Aeronautica degli Stati Uniti, chiamato “Un approccio particolare alla Fisica di base”. Una lunga permanenza presso l'Accademia consentì di collaborare con il Colonnello James Head e il Tenente Col. Rolf Enger, i principali autori del Modello a Particelle (Punti materiali), e con altri membri del dipartimento. Questa utilissima collaborazione è stata il punto di partenza di questo progetto.

Il coautore (JWJ) venne coinvolto con il modello IUPP chiamato “Fisica nel Contesto”, sviluppato da John Ridgen (American Institute of Physics), David Griffiths (Oregon State University) e Lawrence Coleman (University of Arkansas a Little Rock). Questa collaborazione ha ricevuto il supporto della National Science Foundation (NSF) per lo sviluppo di nuovi approcci contestuali e, in seguito, per la sovrapposizione contestuale usata in questo libro e descritta più avanti in dettaglio nella Prefazione.

L'approccio combinato IUPP in questo libro ha le seguenti caratteristiche:

- È un approccio evolutivo (piuttosto che un approccio rivoluzionario), che dovrebbe soddisfare l'attuale richiesta della comunità dei fisici.
- Elimina alcuni argomenti di Fisica classica (come i circuiti in corrente alternata e gli strumenti ottici) e pone minore enfasi sul modo del corpo rigido, sull'ottica e su alcuni aspetti della termodinamica.
- Introduce subito nel testo alcuni argomenti della Fisica contemporanea, come le forze fondamentali, la relatività ristretta, la quantizzazione dell'energia e il modello di Bohr dell'atomo di idrogeno.
- Esprime un tentativo voluto di mostrare l'unità della Fisica e la natura globale dei principi fisici.
- Come strumento incentivante, il testo collega i principi di Fisica a interessanti argomenti biomedici, alle conseguenze di interesse sociale, ai fenomeni naturali e ai progressi tecnologici.

Altri sforzi di inglobare i risultati della ricerca in didattica della Fisica hanno portato all'aggiunta di diversi contenuti presenti nel testo. Questi includono: Quiz rapidi, Domande oggettive, Prevenire le insidie, **E se?** presenti negli esempi guidati, l'uso degli istogrammi energetici, l'approccio modellistico alla risoluzione dei problemi e l'approccio energetico globale introdotto nel Capitolo 7.

## Obiettivi

Questo testo introduttivo di Fisica ha due obiettivi principali: fornire allo studente una presentazione chiara e logica dei concetti e dei principi fisici di base, e rafforzare la comprensione dei concetti e dei principi mediante un ampio campo di interessanti applicazioni nel mondo reale. Per raggiungere questi obiettivi, abbiamo enfatizzato solide argomentazioni fisiche e metodologie per la risoluzione dei problemi. Allo stesso tempo, abbiamo cercato di motivare lo studente utilizzando esempi pratici che dimostrano il ruolo della Fisica nelle altre discipline, quali l'Ingegneria, la Chimica e la Medicina.

## Variazioni nella Quinta Edizione

In questa quinta edizione, sono stati apportati numerosi miglioramenti; molti di essi derivano dalle recenti scoperte della didattica della Fisica e dai commenti e suggerimenti forniti dai revisori del manoscritto e dei docenti che hanno adottato le prime quattro edizioni. Le seguenti rappresentano le variazioni più importanti della quinta edizione:

**Nuovi contesti.** L'approccio di sovrapposizione contestuale è descritto più avanti alla voce "Organizzazione". La quinta edizione introduce due nuovi Contesti: per il Capitolo 15, "Attacchi di cuore" e per i Capitoli 22-23, "Magnetismo in Medicina". Entrambi i Contesti sono finalizzati all'applicazione della Fisica nel campo biomedico.

Nel Contests "Attacchi di cuore", studieremo il flusso di fluidi attraverso dei tubi, in analogia col flusso sanguigno attraverso il sistema vascolare umano. Molti dettagli del flusso sanguigno sono correlati ai rischi di malattie cardiovascolari. Inoltre, discuteremo i nuovi sviluppi nello studio del flusso sanguigno e degli attacchi di cuore, che si avvalgono dell'utilizzo di nanoparticelle e imaging computerizzato.

Il Contests "Magnetismo in Medicina" esplora le applicazioni dei principi dell'elettromagnetismo per la diagnosi e le procedure terapeutiche in medicina. Cominceremo descrivendo la storia dell'uso del magnetismo, inclusi alcuni dispositivi medici da ciarlatani. Applicazioni più recenti includono le procedure di navigazione magnetica a distanza per l'ablazione cardiaca con catetere, usate per la cura della fibrillazione atriale, la stimolazione magnetica transcranica per il trattamento della depressione, e l'imaging a risonanza magnetica come strumento diagnostico.

**Esempi guidati.** Gli esempi guidati sono stati rielaborati e sono presentati in un formato a doppia colonna per accettare i concetti di fisica. La colonna a sinistra mostra le informazioni testuali che descrivono i passaggi per risolvere il problema. La colonna a destra mostra le operazioni matematiche e i risultati di ciascun passaggio. Questa struttura facilita il confronto tra il concetto e la sua esecuzione matematica e aiuta gli studenti a organizzare il lavoro. Gli esempi seguono fedelmente la Strategia generale per la risoluzione dei problemi introdotta nel Capitolo 1, e in tal modo migliorano la capacità di risoluzione dei problemi. In quasi tutti i casi, gli esempi sono risolti simbolicamente fino alla fine, quando il dato numerico viene sostituito all'interno del risultato simbolico finale. Questa procedura permette allo studente di analizzare il risultato simbolico per verificare come il risultato dipenda dai parametri del problema oppure per verificare la correttezza del risultato finale. Un esempio guidato è mostrato nella pagina successiva.

**Revisione progressiva dei quesiti e dei gruppi di problemi.** Per la quinta edizione, gli autori hanno revisionato ciascun quesito e incorporato le revisioni per migliorarne chiarezza e leggibilità. Per rendere i problemi più comprensibili sia agli studenti che ai docenti, questa revisione ha previsto modifiche di contenuto e di lunghezza, aggiunta di figure laddove appropriato e introduzione di una architettura del problema, mediante la suddivisione in parti ben definite.

**Esempio 6.6 | Un blocco trascinato su una superficie senza attrito**

Ogni soluzione è stata scritta in modo da seguire fedelmente la Strategia per la risoluzione dei problemi presentata nel Capitolo 1, in modo tale da rafforzare la capacità di risoluzione dei problemi.

Ciascun passaggio della soluzione è presentato in un formato a due colonne. La colonna di sinistra fornisce una spiegazione di ogni passaggio matematico presente nella colonna di destra, in modo da consolidare meglio i concetti di Fisica.

Un blocco di 6.00 kg, inizialmente fermo, è tirato verso destra su una superficie orizzontale liscia da una forza costante orizzontale di 12.0 N. Trovare la velocità del blocco dopo che si è spostato di 3.00 m.

**SOLUZIONE**

**Concettualizzazione** La Figura 6.14 illustra la situazione. Immagina di tirare un'automobile giocattolo su un tavolo orizzontale con un elastico orizzontale attaccato alla parte anteriore dell'auto. La forza viene mantenuta costante assicurandosi che l'elastico allungato abbia sempre la stessa lunghezza.

**Classificazione** Potremmo applicare le equazioni della cinematica per determinare la soluzione, ma sceglieremo di utilizzare l'approccio mediante considerazioni energetiche. Il blocco è il sistema, e tre forze esterne interagiscono con esso. La forza normale bilancia la forza di gravità sul blocco. Né la forza di gravità né la forza normale compiono lavoro sul blocco perché queste forze sono verticali e lo spostamento è orizzontale.

**Analisi** La forza esterna risultante sul blocco è la forza orizzontale di 12 N.

Usando il teorema dell'energia cinetica e notando che l'energia cinetica iniziale è zero, troviamo:

Risolviamo rispetto a  $v_f$  ed usiamo l'Equazione 6.1 per il lavoro svolto sul blocco da  $\vec{F}$ :

Sostituisci i valori numerici:

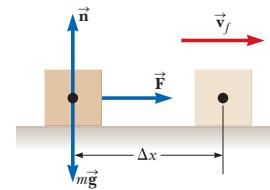
**Conclusione** Ti sarebbe utile risolvere questo problema di nuovo descrivendo il blocco come una particella sotto l'azione di una forza risultante per determinarne l'accelerazione e quindi, trattandola come una particella che si muove con accelerazione costante, trovare la sua velocità finale.

**E se...?** Supponiamo che il modulo della forza in questo esempio venga raddoppiato a  $F' = 2F$ . Il blocco di 6.0 kg accelererà a 3.5 m/s a causa della forza applicata durante lo spostamento  $\Delta x'$ . Come è lo spostamento  $\Delta x'$  rispetto a quello originario  $\Delta x$ ?

**Risposta** Se tiriamo con maggior forza, il blocco accelera fino a raggiungere una data velocità su una distanza inferiore, pertanto ci aspettiamo che  $\Delta x' < \Delta x$ . In entrambi i casi, il blocco sperimenta lo stesso cambiamento di energia cinetica  $\Delta K$ . Matematicamente, dal teorema dell'energia cinetica troviamo:

$$\begin{aligned} W_{\text{est}} &= F'\Delta x' = \Delta K = F\Delta x \\ \Delta x' &= \frac{F}{F'}\Delta x = \frac{F}{2F}\Delta x = \frac{1}{2}\Delta x \end{aligned}$$

e la distanza è inferiore, come suggerito dal nostro ragionamento.



**Figura 6.14** (Esempio 6.6) Un blocco tirato verso destra su una superficie priva di attrito da una forza costante.

$$W_{\text{est}} = K_f - K_i = \frac{1}{2}mv_f^2 - 0 = \frac{1}{2}mv_f^2$$

$$v_f = \sqrt{\frac{2W_{\text{est}}}{m}} = \sqrt{\frac{2F\Delta x}{m}}$$

$$v_f = \sqrt{\frac{2(12 \text{ N})(3.0 \text{ m})}{6.0 \text{ kg}}} = 3.5 \text{ m/s}$$

Gli incisi “E se...?” sono presenti in circa un terzo degli esempi svolti e presentano una variante della situazione descritta nel testo dell'esempio. Ad esempio, un tale elemento potrebbe esplorare gli effetti di una variazione delle condizioni iniziali, determinare cosa accade quando una grandezza viene assunta a un certo valore limite, o chiedere se possano essere determinate informazioni aggiuntive relative al problema. Questo elemento incoraggia gli studenti a riflettere sui risultati dell'esempio e assiste nella comprensione concettuale dei principi.

Il risultato finale è simbolico; i valori numerici vengono sostituiti nel risultato finale.

Problema dalla Quarta Edizione...

- 35.** (a) Consideriamo un corpo esteso le cui differenti parti si trovano a differenti altezze. Assumere che l'accelerazione di caduta libera sia uniforme su tutto il corpo. Provare che l'energia potenziale gravitazionale del sistema corpo-Terra è data da  $U_g = Mg_{\text{CM}}$ , dove  $M$  è la massa totale del corpo e  $g_{\text{CM}}$  è l'altezza del centro di massa rispetto al livello di riferimento scelto. (b) Calcolare l'energia potenziale gravitazionale associata a una rampa costruita rispetto al suolo con pietre di densità 3 800 kg/m<sup>3</sup> e larga 3.60 m (Fig. P8.35). Vista di lato la rampa è un triangolo rettangolo di altezza 15.7 m e base 64.8 m.



**Figura P8.35**

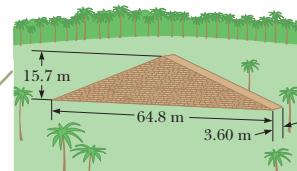
...Come revisionato nella Quinta Edizione:

- 37.** Degli esploratori trovano nella giungla un antico monumento della forma di un grande triangolo isoscele come mostrato in Figura P8.37. Il monumento è formato da migliaia di piccoli blocchi di pietra di densità 3 800 kg/m<sup>3</sup>. Il monumento è alto 15.7 m e largo 64.8 m alla base, con uno spessore uniforme di 3.60 m. Prima della costruzione del monumento, i blocchi di pietra giacevano al suolo. Quanto lavoro hanno compiuto i lavoratori sui blocchi nel portarli nella loro posizione attuale, quando hanno costruito il monumento? Nota: l'energia potenziale gravitazionale di un sistema oggetto-Terra è data da:  $U_g = Mg_{\text{CM}}$ , dove  $M$  è la massa totale dell'oggetto e  $g_{\text{CM}}$  l'altezza del centro di massa al di sopra del livello di riferimento scelto.

Viene fornita una breve introduzione riguardo al problema.

Il calcolo richiesto viene reso più personale richiedendo la stima del lavoro fatto dagli uomini piuttosto che il calcolo dell'energia potenziale gravitazionale.

La figura è stata revisionata e sono state aggiunte le dimensioni.



**Figura P8.37**

L'espressione per l'energia potenziale gravitazionale viene fornita, mentre inizialmente veniva richiesto di dimostrarla.

**Nuova organizzazione dei quesiti.** In questa nuova edizione, abbiamo riorganizzato i quesiti di fine capitolo. Rispetto all'edizione precedente, la sezione è stata suddivisa in *Quesiti* e *Domande concettuali*.

I **Quesiti** sono domande a risposta multipla, problemi vero/falso, problemi di ordinamento o altre domande di tipo intuitivo. Alcuni richiedono calcoli mirati ad aumentare la familiarità dello studente con le equazioni, le variabili utilizzate, i concetti che rappresentano le variabili e la relazione tra i concetti. Altri sono di natura prevalentemente concettuale e sono concepiti per incoraggiare la riflessione concettuale. I Quesiti, inoltre, sono scritti tenendo a mente i sistemi di *personal response* e molte di essi possono facilmente essere impiegati utilizzando questi sistemi.

Le **Domande concettuali** sono quesiti più tradizionali di tipo discorsivo e a risposta breve, che richiedono che una riflessione concettuale da parte dello studente riguardo a una situazione fisica.

**Problemi.** In questa edizione, i problemi di fine capitolo sono più numerosi e più variegati (complessivamente, più di 2 200 problemi distribuiti in tutto il testo). Per comodità sia dello studente che del docente, circa i due terzi dei problemi sono connessi a specifici paragrafi del capitolo, inclusi i paragrafi di Collegamento al contesto. I problemi rimanenti, denominati "Problemi generali", non sono connessi ad alcun paragrafo. L'icona **BIO** identifica problemi correlati ad applicazioni mediche e biologiche. Le risposte ai problemi con numero dispari sono riportate alla fine del libro. Per una più immediata identificazione, i numeri dei problemi di facile risoluzione sono contrassegnati in **nero**, quelli di livello intermedio in **azzurro**, e quelli impegnativi in **rosso**.

**Nuove tipologie di problemi.** Abbiamo introdotto quattro tipi di problemi per questa edizione:

I problemi **quantitativi/concettuali** contengono parti che richiedono agli studenti di pensare in modo sia quantitativo che concettuale. Un esempio di problema quantitativo/concettuale è riportato qui di seguito:

55. Una molla orizzontale attaccata a una parete ha una costante di forza  $k = 850 \text{ N/m}$ . Un blocco di massa  $m = 1.00 \text{ kg}$  è attaccato alla molla e si trova su una superficie senza attrito, orizzontale come nella Figura P7.55. (a) Il blocco è tirato in una posizione  $x_i = 6.00 \text{ cm}$  dalla posizione di equilibrio e rilasciato. Trova l'energia potenziale elastica immagazzinata nella molla quando il blocco è a 6.00 cm dalla posizione di equilibrio e quando il blocco passa per la posizione di equilibrio. (b) Trova la velocità del blocco quando passa per la posizione di equilibrio. (c) Qual è la velocità del blocco quando è in una posizione  $x_i/2 = 3.00 \text{ cm}$ ? (d) Perché la risposta al quesito (c) non è la metà della risposta al quesito (b)?

Le parti (a)-(c) del problema richiedono calcoli quantitativi.

La parte (d) pone un quesito concettuale relativo alla situazione descritta.

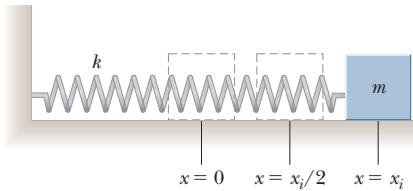


Figura P7.55

I problemi **simbolici** richiedono agli studenti di risolvere un problema utilizzando la sola manipolazione simbolica. La maggior parte degli intervistati in un ampio sondaggio ha richiesto specificamente un aumento del numero di problemi simbolici nel testo, in quanto essi rispecchiano al meglio il modo in cui i docenti vogliono che i loro studenti ragionino

quando risolvono i problemi di Fisica. Un esempio di problema simbolico è riportato qui di seguito:

- 57. Problema di ricapitolazione.** Una tavola uniforme di lunghezza  $L$  scorre lungo un piano orizzontale, liscio, senza attrito come mostrato in Figura P7.57a. La tavola poi scivola oltre il bordo con una superficie orizzontale ruvida. Il coefficiente di attrito dinamico tra la tavola e la seconda superficie è  $\mu_d$ . (a) Trova l'accelerazione della tavola all'istante in cui la sua prima estremità ha percorso una distanza  $x$  oltre il bordo. (b) La tavola si ferma nel momento in cui la sua seconda estremità raggiunge il bordo come mostrato in Figura P7.57b. Trova la velocità iniziale  $v$  della tavola.

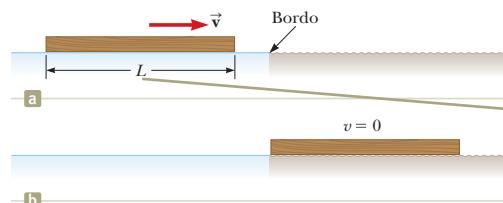


Figura P7.57

57. (a)  $-\mu_d g x / L$  (b)  $(\mu_d g L)^{1/2}$

Non sono presenti valori numerici.

La figura mostra solo grandezze simboliche.

Le risposte al problema sono esclusivamente simboliche.

I **problemI guidati** aiutano gli studenti a scomporre i problemi in passaggi. Un problema di **Fisica**, tipicamente, chiede di trovare una grandezza fisica in un dato contesto. Spesso, però, per ottenere la risposta finale è richiesta l'applicazione di vari concetti e l'esecuzione di un certo numero di calcoli. Molti studenti non sono abituati a un tale livello di complessità e il più delle volte non sanno da dove cominciare. Un problema guidato scomponete un problema standard in passaggi più piccoli, consentendo agli studenti di afferrare tutti i concetti e le strategie richiesti per arrivare alla soluzione esatta. A differenza dei problemI di fisica standard, la guida è spesso inglobata nel testo del problema. I problemI guidati riflettono il modo in cui uno studente dovrebbe interagire con un docente in una sessione di ricevimento. Questi problemI (ce n'è uno in ogni capitolo) permettono agli studenti di allenarsi a suddividere un problema complesso in una serie di problemI più semplici, un'abilità di risoluzione essenziale. Un esempio di problema guidato è riportato nella pagina seguente.

- 28.** Un'asta uniforme appoggiata su due perni ha lunghezza  $L = 6.00 \text{ m}$  e massa  $M = 90.0 \text{ kg}$ . Il perno al di sotto dell'estremità sinistra esercita una forza normale  $n_1$  sull'asta e il secondo perno posizionato a distanza  $\ell = 4.00 \text{ m}$  dall'estremo sinistro esercita una forza normale  $n_2$ . Una donna di massa  $m = 55.0 \text{ kg}$  sale sull'estremo sinistro dell'asta e inizia a camminare verso destra come in Figura P10.28. Lo scopo di questo esercizio è trovare la posizione della donna quando l'asta inizia a inclinarsi. (a) Qual è il modello appropriato di analisi per l'asta prima che si inclini? (b) Disegnare il diagramma delle forze per l'asta evidenziando le forze gravitazionali e normali agenti sull'asta e ponendo la donna a distanza  $x$  dal primo perno, che funge da origine dell'asse. (c) Dove si trova la donna quando la forza normale  $n_1$  ha il valore massimo? (d) Quanto vale  $n_1$  quando l'asta sta per inclinarsi? (e) Usare l'Equazione 10.27 per trovare il valore di  $n_2$  quando l'asta sta per inclinarsi. (f) Usando il risultato del punto (d) e l'Equazione 10.28, calcolando i momenti delle forze rispetto al secondo perno, trovare la posizione  $x$  della donna quando l'asta sta per inclinarsi. (g) Controllare la risposta al quesito (e) calcolando il momento intorno al primo perno.

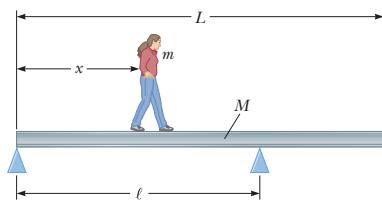


Figura P10.28

Viene identificato l'obiettivo del problema.

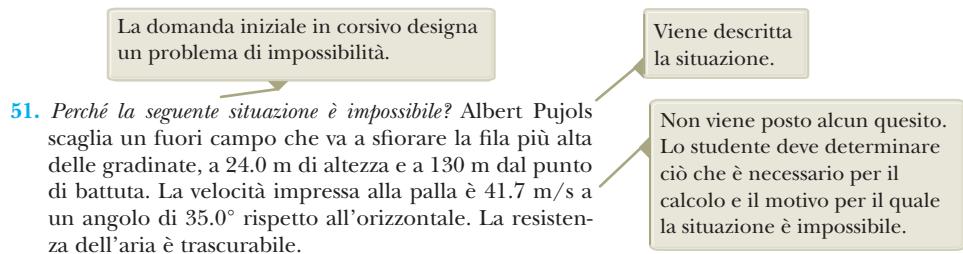
L'analisi comincia con l'identificazione del modello di analisi appropriato.

Vengono forniti dei suggerimenti sui passi da seguire per risolvere il problema.

Viene richiesto il calcolo associato all'obiettivo.

**Problemi di impossibilità.** La ricerca sulla didattica della Fisica si è concentrata molto sulle abilità di risoluzione dei problemi degli studenti. Benché la maggior parte dei problemi di questo testo sia strutturata in una forma che fornisce dati e richiede un risultato di calcolo, due problemi in ciascun capitolo, in media, sono strutturati come problemi di impossibilità. Questi sono introdotti con la frase *Perché la seguente situazione è impossibile?*, seguita dalla descrizione di una situazione. L'aspetto sorprendente di questi problemi è il fatto che essi non pongono alcuna domanda agli studenti oltre a quella introduttiva in corsivo. Lo studente deve determinare quali domande bisogna porsi e quali calcoli bisogna eseguire. Sulla base dei risultati di tali calcoli, lo studente deve determinare il motivo per cui la situazione descritta non è possibile. Tale determinazione potrebbe richiedere informazioni derivanti da esperienze personali, buon senso, ricerche su Internet o in letteratura, misurazioni, strumenti matematici, conoscenza di convenzioni o pensiero scientifico.

Questi problemi possono essere assegnati agli studenti allo scopo di far sviluppare loro abilità di pensiero critico. Essi sono anche divertenti, avendo l'aspetto di "misteri" della fisica che gli studenti, individualmente o in gruppo, devono risolvere. Un esempio di problema di impossibilità è riportato di seguito:

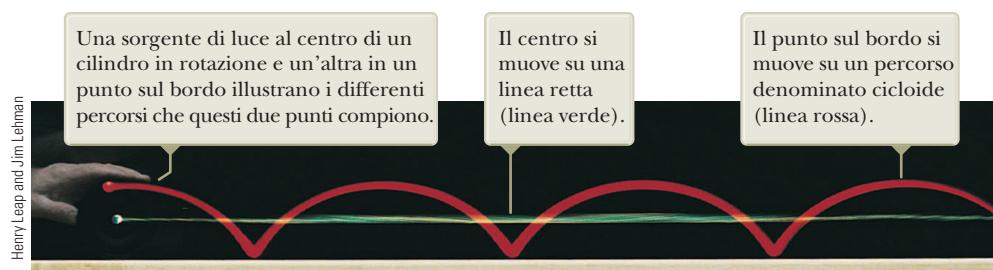


**Incremento del numero di problemi accoppiati.** In seguito al riscontro positivo ottenuto da una ricerca di mercato, abbiamo aggiunto altri problemi accoppiati in questa edizione. Si tratta di problemi identici, ma uno richiede una soluzione numerica e l'altro una derivazione simbolica. In questa edizione, sono presenti tre coppie di tali problemi alla fine della maggior parte dei capitoli, indicati da un'ombreggiatura.

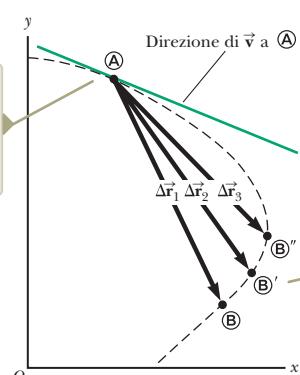
**Estensiva revisione della grafica.** Ogni elemento iconografico della Quinta edizione è presentato in uno stile moderno che contribuisce a esprimere i principi di Fisica in azione in modo chiaro e preciso. Ciascun elemento iconografico è stato inoltre revisionato in modo tale da garantire che la situazione fisica presentata corrisponda esattamente alla discussione in esame.

In molte figure sono inclusi *fumetti esplicativi*, che sottolineano aspetti importanti della figura o guidano gli studenti attraverso un processo illustrato dalla figura o dalla foto. Questo formato aiuta gli studenti che hanno un tipo di apprendimento più visivo. Esempi di figure con fumetti esplicativi sono riportati di seguito.

**Figura 10.28** Due punti su un oggetto che rotola percorrono diversi cammini nello spazio.



Quando l'estremo del vettore spostamento tende ad  $\textcircled{A}$ , l'intervallo di tempo  $\Delta t$  tende a zero e la direzione di  $\vec{\Delta r}$  tende alla linea tangente (in verde) alla curva  $\textcircled{A}$ .



Quando l'estremo del vettore spostamento si muove da  $\textcircled{B}$  a  $\textcircled{B}'$  a  $\textcircled{B}''$ , il relativo spostamento e gli intervalli di tempo corrispondenti diventano sempre più piccoli.

**Figura 3.2** Quando una particella si muove tra due punti, la sua velocità media ha la direzione del vettore spostamento  $\Delta \vec{r}$ . Per definizione, la velocità istantanea in  $\textcircled{A}$  è diretta lungo la linea tangente in  $\textcircled{A}$  alla curva.

**Miglioramento dell'approccio con modelli di analisi.** Gli studenti affrontano centinaia di problemi durante il corso di Fisica, le cui basi sono costituite da un numero esiguo di principi fondamentali. Quando si trova ad affrontare un nuovo problema, il fisico crea un *modello* del problema che possa essere risolto in modo semplice identificando il principio fondamentale applicabile ad esso. Ad esempio, molti problemi riguardano la conservazione dell'energia, la seconda legge di Newton o le equazioni cinematiche. Poiché il fisico ha studiato estesamente questi principi e comprende le applicazioni ad essi associate, egli applica tali conoscenze come modello per la soluzione di un nuovo problema.

Benché sarebbe l'ideale per gli studenti seguire questa stessa procedura, la maggior parte di essi ha difficoltà ad acquisire dimestichezza con l'intero spettro di principi fondamentali disponibili. Per gli studenti è più semplice identificare una *situazione* piuttosto che un principio fondamentale. L'approccio con *modelli di analisi* su cui focalizziamo l'attenzione si basa su un insieme standard di situazioni che compaiono nella maggior parte dei problemi di fisica. Tali situazioni sono riferite a un'entità appartenente a uno di quattro modelli semplificati: punto materiale, sistema, corpo rigido e onda.

Una volta identificato il modello semplificato, lo studente pensa a cosa l'entità sta facendo o a come interagisce con il suo ambiente, e questo lo conduce a identificare un determinato modello di analisi per il problema. Ad esempio, se un oggetto sta cadendo, esso è riconosciuto come un punto materiale sottoposto a un'accelerazione costante dovuta alla gravità. Lo studente ha appreso che questa situazione è descritta dal modello di analisi di un punto materiale sottoposto ad accelerazione costante. Inoltre, questo modello ha un piccolo numero di equazioni associate da usare per dare inizio alla soluzione dei problemi, le equazioni cinematiche presentate nel Capitolo 2. Pertanto, la comprensione della situazione ha condotto a un modello di analisi, che ha poi indicato un piccolissimo numero di equazioni per dare inizio alla soluzione del problema piuttosto che la miriade di equazioni che gli studenti vedono nel testo. In questo modo, l'uso dei modelli di analisi porta lo studente a identificare il principio fondamentale che i fisici identificherebbero. Con l'acquisizione di un'esperienza sempre maggiore, lo studente farà sempre meno ricorso all'uso dei modelli di analisi e comincerà a identificare direttamente i principi fondamentali, come fanno i fisici. L'approccio è ulteriormente approfondito nel box al termine dei capitoli dal titolo Modelli di analisi per la risoluzione dei problemi.

**Variazione dei contenuti.** I contenuti e l'organizzazione del testo è essenzialmente la stessa rispetto alla quarta edizione. Molti paragrafi in vari capitoli sono stati ridotti, eliminati o combinati con altri paragrafi per permettere una presentazione più equilibrata. I Capitoli 6 e 7 sono stati completamente riorganizzati per preparare gli studenti a un approccio unificato riguardante l'energia che è usato in tutto il testo. Sono stati aggiunti degli aggiornamenti che riflettono lo stato dell'arte di molte aree di ricerca e applicazione della Fisica, incluse informazioni sulla scoperta di oggetti nella fascia di Kuiper (Capitolo 11), confronti tra teorie contrastanti sulla percezione dei suoni nell'uomo (Capitolo 14), e progressi nell'utilizzo del reticolo di valvole luminose per le applicazioni ottiche (Capitolo 27).

## | Organizzazione

Abbiamo incorporato nel testo uno schema del tipo "sovraposizione contestuale", come risposta al metodo IUPP "Fisica nel Contesto". Questa nuova caratteristica aggiunge interessanti applicazioni del materiale alle reali esigenze. Abbiamo sviluppato questa caratteristica in modo da renderla flessibile; è una sovrapposizione nel senso che il docente che non volesse seguire l'approccio potrà semplicemente ignorare i contenuti contestuali aggiuntivi senza sacrificare la completa copertura dei contenuti esistenti. Crediamo, tuttavia, che molti studenti trarranno beneficio da questo approccio.

L'organizzazione della sovrapposizione contestuale suddivide il testo in otto paragrafi o contesti, dopo il Capitolo 1, nel modo seguente:

| Numero del contesto | Contesto                             | Argomento di Fisica | Capitoli |
|---------------------|--------------------------------------|---------------------|----------|
| 1                   | Veicoli con combustibili alternativi | Meccanica classica  | 2-7      |
| 2                   | Missione su Marte                    | Meccanica classica  | 8-11     |
| 3                   | Terremoti                            | Vibrazioni e onde   | 12-14    |
| 4                   | Attacchi di cuore                    | Fluidi              | 15       |
| 5                   | Il riscaldamento globale             | Termodinamica       | 16-18    |
| 6                   | Fulmini                              | Elettricità         | 19-21    |
| 7                   | Magnetismo in medicina               | Magnetismo          | 22-23    |
| 8                   | Laser                                | Ottica              | 24-27    |

Ciascun Contesto inizia con una introduzione che fornisce qualche nota storica oppure traccia un collegamento tra l'argomento del Contesto e le questioni sociali correlate. L'introduzione del Contesto si conclude con una "domanda centrale" capace di motivare lo studio all'interno del Contesto. Il paragrafo finale di ciascun capitolo è un Collegamento al contesto, in cui si discute la relazione tra l'argomento del capitolo e la domanda centrale. Il capitolo finale di ciascun Contesto è seguito dalle "Conclusioni". Ciascuna di queste sezioni applica i principi appresi nei vari capitoli al Contesto per rispondere in modo esauriente alla domanda centrale. Ciascun capitolo, così come le Conclusioni, includono problemi correlati ai contenuti contestuali.

## | Caratteristiche del testo

La maggior parte dei docenti ritiene che il libro di testo scelto per il corso debba costituire la guida principale per la comprensione e l'apprendimento della materia. In aggiunta, il testo dovrebbe essere di facile accessibilità, nel senso che lo stile e la scrittura dovrebbero rendere più semplici sia l'insegnamento che l'apprendimento. Considerando tali requisiti, abbiamo incluso molti aspetti didattici, elencati di seguito, che hanno lo scopo di accrescere l'utilità di questo testo sia per gli studenti che per gli insegnanti.

### Soluzione dei problemi e comprensione dei concetti

**Strategia generale per la risoluzione dei problemi.** Una strategia generale, delineata alla fine del Capitolo 1, fornisce agli studenti un processo strutturato per affrontare i problemi. Questa strategia viene seguita esplicitamente in tutti gli esempi che si incontrano nei restanti capitoli, in modo che lo studente impari ad applicarla. Lo studente è anche incoraggiato ad applicare questa strategia nell'affrontare i problemi alla fine dei capitoli.

In molti capitoli, sono stati inclusi strategie più specifiche e suggerimenti per risolvere i tipi di problemi presentati alla fine di ogni capitolo. Questa caratteristica aiuta gli studenti a identificare i passaggi essenziali per la risoluzione dei problemi e a potenziare le proprie abilità di risoluzione.

**Fisica ragionata.** Abbiamo incluso molti esempi di Fisica Ragionata nei vari capitoli. Queste domande connettono i concetti fisici alle esperienze comuni o estendono i concetti oltre ciò che è discusso nel testo. Queste domande sono immediatamente seguite dalla sezione "Ragionamento" che risponde alla domanda. Lo studente può usare questi suggerimenti per capire meglio i concetti di fisica prima che siano presentati con esempi quantitativi e prima di svolgere gli esercizi a casa.

**Quiz rapidi.** I quiz sono una opportunità per verificare la comprensione del concetto fisico appena incontrato. Per rispondere ai quiz gli studenti devono decidere in base a ragionamenti sensati e molti dei quiz sono stati studiati per aiutare gli studenti ad evitare fraintendimenti molto comuni. Il formato dei quiz è oggettivo, e include domande a risposta multipla, il vero-falso e l'ordinamento. Le risposte ai quiz si trovano alla fine del libro. I docenti possono scegliere di usare i quiz in modo tradizionale o con sistemi interattivi e di *personal response*. Di seguito è riportato un esempio di quiz.

**QUIZ RAPIDO 6.5** Una freccia è inserita in una pistola lancia-frecce a molla. Quest'ultima viene compressa di una quantità  $x$ . Per caricare la freccia successiva, la molla viene compressa  $2x$ . Quanto più elevata sarà la velocità di questa seconda freccia rispetto alla prima? (a) Quattro volte (b) Due volte (c) Uguale (d) La metà (e) Un quarto.

### Prevenire le insidie | 13.2

#### Due tipi di velocità

Attenzione a non confondere la velocità  $v$  dell'onda mentre si propaga nella corda, con  $v_y$ , velocità trasversale di un elementino di corda. La velocità  $v$  è costante per un dato mezzo uniforme, mentre  $v_y$  varia con legge sinusoidale.

**Prevenire le insidie.** Il testo mette a disposizione più di 150 Prevenire le insidie (come quello a lato), che hanno lo scopo di aiutare gli studenti ad evitare errori e fraintendimenti diffusi. Questi inserti, posizionati a margine del testo, riguardano sia i fraintendimenti più comuni che quelle situazioni tipiche in cui gli studenti tendono ad avventurarsi su strade senza sbocco.

**Sommari.** Ogni capitolo termina con un sommario che riassume i concetti e le equazioni più importanti appena discussi. La novità della quinta edizione è l'inserto Modelli di analisi per la risoluzione dei problemi presente nel Sommario, che evidenzia i modelli di analisi rilevanti presenti in un determinato capitolo.

**Domande.** Come discusso precedentemente, la sezione “Quesiti” della precedente edizione è adesso suddivisa in *Quesiti* e *Domande concettuali*. Il docente può scegliere di selezionarne alcune e assegnarle come compito a casa o in classe, possibilmente con sistemi interattivi e di *personal response*. Più di settecento Quesiti e Domande concettuali sono incluse nella presente edizione.

**Problemi.** Un’ampia raccolta di problemi è presente alla fine di ogni capitolo; complessivamente, questa edizione contiene più di 2 200 problemi. Risposte ai problemi con numero dispari sono presenti alla fine del testo.

In aggiunta ai nuovi tipi di problemi menzionati precedentemente, in questo testo vengono presentati numerosi altri tipi di problemi:

- **Problemi biomedici.** In questa edizione abbiamo aggiunto un certo numero di problemi correlati a situazioni biomediche (ciascuno identificato con l’icona **BIO**), per sottolineare la rilevanza dei principi di Fisica per gli studenti dei corsi di laurea in scienze della vita.
- **Problemi accoppiati.** Per garantire un supporto agli studenti che apprendono la risoluzione simbolica dei problemi, in tutti i capitoli del testo è stata aggiunta una coppia di problemi simbolici e numerici. I problemi accoppiati sono indicati da un’ombreggiatura.
- **Problemi di ricapitolazione.** Molti capitoli contengono problemi di riepilogo, che richiedono allo studente di combinare i concetti esposti in quel capitolo con altri già acquisiti in capitoli precedenti. Questi problemi (indicati come **Problemi di ricapitolazione**) riflettono il carattere integrativo dei principi presenti nel testo e dimostrano come la Fisica sia una costruzione di idee non dissociate. Di fronte ad argomenti del mondo reale, come il riscaldamento globale o le armi nucleari, potrebbe essere necessario fare appello ad idee che si trovano esposte in parti diverse di un testo di Fisica come questo.
- **“Problemi alla Fermi”.** Ogni capitolo contiene almeno un problema che chiede allo studente di ragionare in termini di ordini di grandezza.
- **Problemi di progettazione.** In parecchi capitoli compaiono dei problemi per i quali lo studente deve determinare i parametri di un progetto affinché il prodotto finale possa funzionare correttamente.
- **Problemi basati sul calcolo differenziale.** La maggior parte dei capitoli contiene almeno un problema per cui sono essenziali le idee ed i metodi propri del calcolo differenziale e integrale.

**Rappresentazioni alternative.** Vengono enfatizzate rappresentazioni alternative dell’informazione, incluse quelle mentali, visive, grafiche, tabulari e matematiche. Molti problemi sono più semplici da risolvere se le informazioni sono presentate in modi alternativi, per soddisfare i differenti metodi di studio.

**Appendice di Matematica.** L’Appendice B è uno strumento prezioso per gli studenti, che mostra gli strumenti matematici nel contesto fisico. Questa risorsa è ideale per gli studenti che necessitano di una rapida revisione su argomenti come algebra, trigonometria e calcolo.

## Aspetti coadiuvanti

**Stile.** Per facilitare una rapida comprensione, abbiamo provato a comporre il testo in uno stile che fosse chiaro, logico e coinvolgente. Allo stesso tempo, abbiamo scelto uno stile piuttosto informale e scorrevole, in modo tale che lo studente trovi la lettura più interessante e gradevole. I nuovi termini sono accuratamente definiti, e abbiamo evitato l’uso del gergo.

**Definizioni ed equazioni importanti.** Le definizioni più importanti appaiono in **grassetto** o evidenziate separandole dal paragrafo e centrando per aggiungere enfasi e facilitare la ripetizione. Analogamente, le equazioni importanti sono evidenziate con un’ombreggiatura.

**Note a margine.** I commenti e le note al margine contrassegnate dall’icona ► possono essere usati per individuare importanti definizioni, equazioni o concetti significativi.

**Uso pedagogico del colore.** I lettori dovrebbero consultare la **carta dei colori** che appare nella seconda di copertina per un elenco dei simboli colorati che vengono impiegati nei diagrammi del testo. Il sistema è seguito in modo coerente in tutto il testo.

**Livello matematico.** Abbiamo introdotto il calcolo matematico gradualmente, tenendo a mente che gli studenti spesso seguono contemporaneamente corsi introduttivi di calcolo e di fisica. Molti passaggi sono mostrati quando le equazioni di base vengono sviluppate, e viene fatto un riferimento alle appendici matematiche alla fine del libro. Anche se i vettori sono discussi in dettaglio nel Capitolo 1, i prodotti dei vettori sono introdotti più tardi nel testo, dove sono richiesti nelle applicazioni fisiche. Il prodotto indicato dal punto viene introdotto nel Capitolo 6, in cui si discute dell'energia di un sistema; il prodotto indicato dalla croce viene introdotto nel Capitolo 10, in cui si discute del momento angolare.

**Cifre significative.** Sia negli esempi svolti che nei problemi di fine capitolo, una cura particolare è stata dedicata al trattamento delle cifre significative. La maggior parte degli esempi viene risolta con due o tre cifre significative, a seconda della precisione dei dati forniti. Di norma, la precisione dei dati e delle risposte dei problemi di fine capitolo è di tre cifre significative. Laddove si effettuino calcoli di stima, tipicamente si opera con una sola cifra significativa. (Una discussione più approfondita delle cifre significative si può trovare nel Capitolo 1.)

**Unità di misura.** Il testo si basa sul Sistema Internazionale delle unità di misura (SI). Occasionalmente, e solo nei capitoli dedicati alla meccanica ed alla termodinamica, si farà uso del sistema pratico statunitense.

**Appendici e risvolti di copertina.** Una serie di appendici è presente alla fine del libro. Molte di esse sono una rassegna dei concetti e delle tecniche di matematica impiegati nel testo, come la notazione scientifica, l'algebra, la geometria, la trigonometria, il calcolo differenziale ed integrale. Nel testo viene fatto riferimento a queste appendici. La maggior parte delle ricapitolazioni matematiche delle appendici contiene esempi svolti ed esercizi con risposta. Altre appendici contengono tavole di dati fisici, tabelle di conversione, le unità SI delle grandezze fisiche e la tavola periodica degli elementi. I risvolti di copertina contengono altre informazioni utili: costanti fondamentali, dati di fisica, dati del Sistema Solare, una lista dei prefissi standard, simboli matematici, l'alfabeto greco e le abbreviazioni standard delle unità di misura.

## | Opzioni per i docenti

Sebbene molti argomenti presenti nei testi tradizionali siano stati omessi in questo testo, i docenti potrebbero ritenere che in questo volume vi sia più materiale di quanto se ne possa trattare in due semestri. Per questa ragione, si possono seguire i seguenti suggerimenti. Se si desidera porre maggiore enfasi sugli argomenti di Fisica moderna, possono essere tralasciati i Capitoli 15, 16, 17, 18, 24, 25 e 26. Al contrario, se si vuole seguire un approccio più tradizionale con maggiore enfasi sulla Fisica classica, i capitoli da tralasciare sono 9 e 11. Entrambi gli approcci possono essere seguiti senza alcuna perdita di continuità. Altre opzioni possono prevedere un approccio intermedio tra i due, scegliendo di omettere alcuni o tutti i seguenti paragrafi, che possono essere considerati facoltativi:

- 3.6 Velocità relativa e accelerazione relativa
- 6.10 Diagrammi di energia ed equilibrio di un sistema
- 9.9 Relatività generale
- 10.12 Rotolamento dei corpi rigidi
- 12.6 Oscillazioni smorzate
- 12.7 Oscillazioni forzate
- 14.6 Configurazioni d'onda non sinusoidali
- 14.7 Orecchio e teorie della percezione del tono
- 15.8 Altre applicazioni di dinamica dei fluidi
- 16.6 Distribuzione delle velocità molecolari
- 17.7 Calori specifici molari dei gas perfetti
- 17.8 Trasformazioni adiabatiche per un gas perfetto
- 17.9 Calori specifici molari ed equipartizione dell'energia
- 20.10 Condensatori con dielettrici
- 22.11 Magnetismo nella materia
- 26.5 L'occhio
- 27.9 Difrazione di raggi X da cristalli

**Materiale di supporto per i docenti.** I docenti che utilizzano il testo a scopo didattico possono scaricare dal sito [www.edises.it](http://www.edises.it), previa registrazione all'area docenti, le immagini del libro in formato Power Point.

**È giusto** dare qualche suggerimento a vantaggio dello studente. Si presume che questi abbiano già letto la Prefazione, che descrive le varie caratteristiche del testo e dei materiali di supporto che potranno aiutarlo durante tutto il corso.

## | Come studiare

Molto spesso ai docenti viene chiesto: “Come dovrei studiare la Fisica e prepararmi per l’esame?” Non è semplice rispondere a questa domanda, ma desideriamo comunque offrire alcuni suggerimenti basati sulle nostre esperienze personali, maturata in lunghi anni di apprendimento e poi di insegnamento.

La cosa più importante è mantenere sempre un atteggiamento positivo verso ciò che si sta studiando, tenendo presente che la Fisica è la più fondamentale fra le scienze naturali. Altri corsi scientifici che seguiranno faranno uso dei principi della Fisica ed è quindi importante che lo studente comprenda e sia capace di applicare i vari concetti e le teorie discussi nel libro.

## | Concetti e principi

È essenziale che lo studente comprenda bene i concetti e i principi di base prima di tentare di risolvere i problemi assegnati. Il modo migliore per far ciò è leggere in anticipo quella parte del testo che riguarda gli argomenti della lezione che dovrà seguire. Nel leggere il testo, lo studente dovrebbe annotare i punti che gli sembrano poco chiari. Inoltre sarebbe meglio fare un serio tentativo di rispondere alle domande dei Quiz Rapidi nel momento in cui si presentano. Ci siamo impegnati per preparare delle domande che permettano allo studente di verificare autonomamente la qualità del suo apprendimento. Si studino, inoltre, con attenzione le note **E se?** presenti in molti degli esempi svolti, che saranno utili per ampliare la comprensione al di là dello svolgimento delle operazioni che portano all’ottenimento di un risultato numerico. Le note “Prevenire le insidie” saranno una guida utile per evitare le convinzioni errate in Fisica. Durante le lezioni, si prendano appunti e si facciano domande sugli argomenti poco chiari. Si tenga in mente che solo poche persone riescono, alla prima lettura, ad assimilare tutte le informazioni contenute nel materiale didattico; sono spesso necessarie più riletture del testo e degli appunti. Le lezioni e il lavoro aggiuntivo in laboratorio sono complementari alla rilettura del testo e dovrebbero servire a chiarire gli argomenti più difficili. Si dovrebbe ridurre al minimo lo studio mnemonico. Memorizzare frasi, di equazioni e dimostrazioni non significa necessariamente che lo studente abbia compreso gli argomenti. La comprensione del materiale didattico aumenterà sicuramente se, ad uno studio efficace, si associano le discussioni con altri studenti e docenti e la capacità di risolvere i problemi presentati nel testo. Si facciano domande ognqualvolta se ne avverte la necessità.

## | Programma di studio

È importante fare un programma di studio, preferibilmente giornaliero, leggere il programma del corso e attenersi al percorso didattico indicato dal docente. Le lezioni appariranno più piene di significato se, *in precedenza*, è stato letto il corrispondente materiale del testo. Come regola generale, si dovrebbero dedicare due ore di studio a casa per ogni ora di lezione in aula. Se si hanno problemi con il corso, si cerchi il consiglio del docente o anche di altri studenti che frequentano il corso; spesso sono utili i consigli degli studenti più anziani. Di frequente, i docenti offrono lezioni di ricapitolazione al di fuori delle ore di lezione regolari. È importante non rimandare lo studio a qualche giorno prima dell’esame; il più delle volte questa abitudine risulta disastrosa. Piuttosto che studiare tutta la notte prima di una verifica, è meglio ripassare rapidamente i concetti e le equazioni di base e farsi un buon sonno.

## | Utilizzo delle peculiarità del testo

È consigliabile utilizzare pienamente le varie peculiarità del testo discusse nella prefazione. Per esempio, le note a margine sono utili per localizzare e descrivere le equazioni e i concetti

importanti, e i caratteri **in grassetto** evidenziano le affermazioni e le definizioni importanti. Molte delle tavole utili sono contenute nelle appendici, ma la maggior parte è incorporata nel testo, nei passaggi in cui viene più spesso utilizzata. L'Appendice B è un utile riassunto delle tecniche matematiche.

Le risposte ai Quiz Rapidi e ai problemi con numero dispari sono riportate alla fine del libro. L'Indice generale fornisce una visione concisa dell'intero testo, mentre l'Indice analitico assicura una facile localizzazione degli argomenti. Le note a piè di pagina sono spesso usate per fornire informazioni aggiuntive o per citare altri riferimenti sugli argomenti trattati.

Dopo aver letto un capitolo, si deve essere capaci di definire tutte le grandezze nuove introdotte in quel capitolo e di discutere i principi e le ipotesi usati per giungere a certe relazioni chiave. In alcuni casi può essere necessario consultare l'Indice analitico del libro per localizzare certi argomenti. È fondamentale associare alle singole grandezze i simboli usati per rappresentarle e le loro unità di misura. Inoltre, bisogna essere capaci di esprimere ciascuna relazione importante in una forma verbale concisa e precisa.

## Come risolvere i problemi

R. P. Feynman, premio Nobel per la Fisica, una volta disse: "Tu non conosci nulla fino a che non lo hai messo in pratica". E con questa frase in mente, invitiamo lo studente a sviluppare le capacità indispensabili per risolvere una vasta gamma di problemi. L'abilità nel risolvere i problemi è la migliore verifica del grado di apprendimento della Fisica e quindi è necessario esercitarsi e risolvere il maggior numero possibile di problemi; tuttavia è essenziale che si comprendano bene i concetti e i principi di base prima di provare a risolvere i problemi. È buona pratica cercare soluzioni alternative per risolvere lo stesso problema. Per esempio, i problemi di meccanica si risolvono usando le leggi di Newton, ma spesso la loro soluzione è più semplice e più rapida se si utilizzano considerazioni energetiche. Non bisogna illudersi pensando di aver capito come risolvere un problema semplicemente perché è stato risolto in aula. Si deve essere capaci di risolvere quel problema o problemi simili per conto proprio.

L'approccio alla risoluzione dei problemi deve essere pianificato con cura. Un piano sistematico è importante specialmente per quei problemi che coinvolgono molti concetti. Per prima cosa, si deve leggere il problema più volte fino a che non risulti chiaro cosa il problema richiede. Si faccia attenzione a qualche parola chiave che aiuti a comprendere il problema e che probabilmente suggerisce qualche ipotesi da fare. L'abilità di capire correttamente le domande è parte integrante della strategia di risoluzione. In secondo luogo, si deve acquisire l'abitudine di scrivere l'elenco dei dati forniti dal problema e le grandezze che sono invece da trovare; per esempio, si può costruire una tabella che contenga le grandezze date e quelle incognite. Questo procedimento viene spesso utilizzato nella soluzione degli esempi svolti proposti nel testo. Infine, dopo aver scelto il metodo che si ritiene appropriato per un determinato problema, si procede alla sua risoluzione. La "Strategia generale per la risoluzione dei problemi" sarà una guida nell'affrontare i problemi complessi. Seguendo questo protocollo (*Concettualizzazione, Classificazione, Analisi, Conclusione*), lo studente non solo troverà più facile arrivare ad una soluzione, ma dagli sforzi fatti riceverà maggiori vantaggi. Tale strategia, presentata alla fine del Capitolo 1, viene utilizzata in tutti gli esempi svolti dei capitoli che seguono, in modo che lo studente impari ad applicarla. Nel testo sono presenti anche delle strategie specifiche per la risoluzione dei problemi, riferite a determinati tipi di situazioni e indicate con un titolo particolare; esse seguono comunque il profilo della "Strategia generale per la soluzione dei problemi".

Spesso, gli studenti hanno difficoltà nel riconoscere i limiti di applicabilità di certe formule o di certe leggi fisiche. È molto importante comprendere e ricordare le ipotesi che stanno alla base di una certa teoria o di un certo formalismo. Per esempio in cinematica, certe equazioni si applicano solo a corpi in moto con accelerazione costante. Queste equazioni non sono valide per i moti per i quali l'accelerazione non è costante, come nel caso del moto di un oggetto attaccato ad una molla o del moto di un corpo immerso in un fluido. Si consiglia di studiare con attenzione i "Modelli di analisi per la risoluzione dei problemi" presenti nei sommari dei capitoli, in modo da capire come ciascun modello possa essere applicato ad una specifica situazione. I modelli di analisi forniscono una struttura logica per la risoluzione dei problemi e rendono le abilità di riflessione più simili a quelle dei fisici.

## | **Esp**erimenti

La Fisica è una scienza basata sulle osservazioni sperimentalistiche. Per questa ragione, raccomandiamo allo studente di non limitarsi alla lettura del testo, ma di compiere degli esperimenti sia a casa che in laboratorio. Tali esperimenti possono essere usati per verificare concetti e modelli discussi in aula o nel libro di testo. Per esempio, la molla-giocattolo "Slinky" è un eccellente strumento per studiare la propagazione delle onde; una palla appesa ad un filo che oscilla può essere usata per analizzare il moto di un pendolo; masse diverse appese in verticale ad una molla o un elastico possono essere utilizzate per determinarne le proprietà elastiche; un vecchio paio di occhiali Polaroid, delle lenti non più usate e una lente di ingrandimento sono i componenti con cui eseguire molti esperimenti di ottica; misurando con un cronometro il tempo impiegato da una palla a cadere da un'altezza conosciuta si può ottenere una misura approssimata dell'accelerazione di gravità. L'elenco di possibili esperimenti di questo tipo è senza fine. Quando non si hanno a disposizione modelli fisici già pronti, si usi l'immaginazione e si cerchi di costruirne uno.

È nostra speranza che lo studente trovi la Fisica un'esperienza eccitante ed interessante e che tragga profitto da questa esperienza, al di là della sua scelta professionale. Benvenuto nell'eccitante mondo della Fisica!

*Lo scienziato non studia la natura perché è utile; la studia perché ne riceve gioia, e ne riceve gioia perché la natura è bella. Se la natura non fosse bella, non meriterebbe di essere conosciuta, e se la natura non meritasse di essere conosciuta, la vita non meriterebbe di essere vissuta.*

—HENRI POINCARÉ

# Elenco delle applicazioni e dei problemi riguardanti le Scienze della Vita

## Capitolo 1: Introduzione e Vettori 4

Problemi 16 e 68

## Capitolo 2: Moto in una dimensione 37

Esempio 2.5: Un corridore come un punto materiale, pag. 46  
Problemi 40 e 41

## Capitolo 3: Moto in due dimensioni 69

Problemi 6, 10 e 15

## Capitolo 4: Le leggi del moto 97

Problemi 20 e 55

## Capitolo 5: Altre applicazioni delle leggi di Newton 125

Domanda concettuale 13

Problema 6

## Capitolo 7: Conservazione dell'energia 192

Il corpo umano come sistema non isolato, pag. 203  
Tabella 7.1 Consumo energetico per un'ora di varie attività  
Problemi 31, 32, 59, 62, 63 e 75

## Capitolo 8: Quantità di moto ed urti 235

Vantaggi degli airbag nel ridurre le lesioni, pag. 242  
Test per il glaucoma, pag. 244  
Problemi 3 e 51

## Capitolo 9: Relatività 272

Variazione nella velocità di invecchiamento e relatività, pag. 281  
Limiti umani all'accelerazione tollerabile, pag. 297  
Problema 14

## Capitolo 10: Moto rotazionale 305

Problemi 29, 35, 69, 77, 79 e 85

## Contesto 2 Conclusioni: Pianificazione di una missione di successo 384

Effetti dei viaggi spaziali sulla salute, pag. 386

## Capitolo 12: Moto oscillatorio 390

Problema 58

## Capitolo 13: Onde meccaniche 415

Sonografia Doppler, pag. 433  
Problemi 30, 33, 40 e 69

## Capitolo 14: Sovraposizione e onde stazionarie 447

Paragrafo 14.7: Orecchio e teorie di percezione del tono, pag. 464  
Impianti cocleari, pag. 466  
Problemi 30, 39, 49 e 50

## Contesto 4: Attacchi di cuore 479-481

## Capitolo 15: Meccanica dei fluidi 482

Aghi ipodermici, 483  
Ossigenoterapia iperbarica, pag. 484  
Misurazione della pressione del sangue, pag. 486  
Paragrafo 15.9: Flusso turbolento del sangue, pag. 499

Domanda concettuale 2

Problemi 33 e 52

## Contesto 4 Conclusioni: Individuazione dell'aterosclerosi e prevenzione degli attacchi di cuore 509-512

Flutter vascolare, pag. 510  
Problemi 1-4

## Capitolo 16: Temperatura e teoria cinetica dei gas 515

Senso di caldo e freddo, pag. 516  
Sopravvivenza dei pesci in inverno, pag. 524  
Soffocamento a causa del rilascio esplosivo di anidride carbonica, pag. 525  
Raffreddamento della fronte di un paziente con un panno inzuppato d'alcool, pag. 534  
Problemi 3, 8, 11, 57 e 59

## Capitolo 17: Energia nelle trasformazioni termodinamiche: il primo principio della termodinamica 545

Esempio 17.1: Un modo drastico di perdere peso, pag. 547  
Termoregolazione nell'uomo, pag. 572  
L'ipotalamo, pag. 572  
Meccanismi per il raffreddamento del corpo, pag. 572  
Meccanismi per il riscaldamento del corpo, pag. 573  
Fisica Ragionata 17.3, pag. 573  
Problemi 3, 20, 62, 63, 70 e 80

## Capitolo 18: Macchine termiche, entropia e secondo principio della termodinamica 586

Secondo principio ed evoluzione, pag. 597  
Problema 60

## Capitolo 19: Forze elettriche e campi elettrici 619

Attrazione elettrica delle lenti a contatto, pag. 621

## Capitolo 20: Potenziale elettrico e capacità 656

Capacità delle membrane cellulari, pag. 673  
Potenziale d'azione, pag. 673  
Problemi 57, 60 e 69

## Capitolo 21: Corrente e circuiti a corrente continua 697

Diffusione in sistemi biologici, pag. 703  
Attività elettrica nel cuore, pag. 704  
Ablazione mediante catetere per la cura della fibrillazione atriale, pag. 704-705  
Modello a cavo per la propagazione di un potenziale d'azione lungo un nervo, pag. 726  
Il ruolo della mielina nella conduzione nervosa, pag. 727  
Problemi 20 e 36

## Contesto 7: Magnetismo in Medicina 741-742

## Capitolo 22: Forze e campi magnetici 743

Usi del ciclotrone in medicina, pag. 753  
Paragrafo 22.12: Collegamento al contesto: navigazione magnetica a distanza per operazioni di ablazione cardiaca con catetere, pagg. 769-770  
Problemi 61, 62, 72 e 73

**Capitolo 23: Legge di Faraday e induzione 781**

Paragrafo 23.8: Collegamento al contesto: l'uso della stimolazione magnetica transcranica nella depressione, pagg. 804-805

Stimolazione magnetica transcranica, pag. 805

Problemi 4, 54, 53, 54, 57 e 63

**Contesto 7 Conclusioni: Risonanza magnetica nucleare e imaging a risonanza magnetica 817-819**

Imaging a risonanza magnetica (MRI), pag. 817

Problema 2

**Capitolo 24: Onde elettromagnetiche 822**

Sensibilità dell'occhio, pag. 837

Applicazioni del laser in oftalmologia, pag. 841

Chirurgia laser, pag. 841

Separatore di cellule a laser, pag. 841

Pinzette ottiche, pag. 841

Problemi 38 e 41

**Capitolo 25: Riflessione e rifrazione della luce 852**

Visione subacquea, pag. 860

Problema 21

**Capitolo 26: Formazione dell'immagine da specchi e lenti 879**

Lenti correttive per maschere subacquee, pag. 895

Paragrafo 26.5: L'occhio, pagg. 898-900

Ipermetropia, pag. 899

Miopia, pag. 899

Presbiopia, pag. 900

Astigmatismo, pag. 900

Paragrafo 26.6: Collegamento al contesto: alcune applicazioni mediche, pagg. 900-901

Usi medici del fibroscopio, pag. 900

Usi medici dell'endoscopio, pag. 900

Il sistema chirurgico Da Vinci, pag. 900

Uso del laser per la misura dell'emoglobina, pag. 901

Uso del laser nel trattamento dell'idrocefalia, pag. 901

Chirurgia LASIK, pag. 901

Uso del laser per la rimozione di tatuaggi, pag. 901

Uso del laser nell'iperplasia prostatica benigna, pag. 901

Quesiti 3 e 7

Domande concettuali 6, 11, 13 e 14

Problemi 13, 28, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51 e 52

**Capitolo 27: Ottica ondulatoria 910**

Esempio 27.5: Risoluzione dell'occhio, pag. 924

Figura di Laue di un enzima cristallino, pag. 928

Quesito 12

Problemi 38, 57, 68 e 69

# Conservazione dell'energia

## Schema del capitolo

- 7.1 Modello di analisi: sistema non isolato (energia)
- 7.2 Modello di analisi: sistema isolato (energia)
- 7.3 Modello di analisi: sistema non isolato in stato stazionario (energia)
- 7.4 Situazioni con attrito dinamico
- 7.5 Variazioni di energia meccanica dovute a forze non conservative
- 7.6 Potenza
- 7.7 Collegamento al contesto: valutazione della potenza delle automobili

## SOMMARIO

Nel Capitolo 6 abbiamo introdotto tre metodi per immagazzinare energia in un sistema: energia cinetica, associata al movimento delle parti di un sistema; energia potenziale, determinata dalla configurazione del sistema; e energia interna, correlata con la temperatura del sistema.

Ora consideriamo di analizzare delle situazioni fisiche usando un approccio energetico per due tipi di sistemi: *sistemi non isolati* e *isolati*. Per i sistemi non isolati studieremo i modi in cui l'energia può attraversare i confini del sistema producendo un cambiamento nell'energia totale del sistema. Questa analisi porta a un principio veramente importante detto *conservazione dell'energia*. Il principio di conservazione dell'energia si estende ben oltre la fisica e può esser applicato agli organismi biologici, sistemi tecnologici, e ambiti ingegneristici.

Nei sistemi isolati l'energia non attraversa il contorno del sistema. Per questi sistemi l'energia totale del sistema è costante. Se nel sistema non agiscono forze non conservative, possiamo usare la *conservazione dell'energia meccanica* per risolvere un'ampia varietà di problemi.

Situazioni che coinvolgono la trasformazione dell'energia meccanica in energia interna a causa di forze non conservative richiedono un trattamento speciale. Studieremo i metodi per affrontare questo tipo di problemi.

Quindi, riconosceremo che l'energia può varcare il contorno di un sistema con differenti velocità. Descriveremo la velocità di trasferimento di energia con la *potenza*.



Jade Lee/Getty Images

Tre bambine si godono la trasformazione dell'energia potenziale in energia cinetica su un acquascivolo. Possiamo analizzare processi come questi usando le metodologie sviluppate in questo capitolo.

## 7.1 | Modello di analisi: sistema non isolato (energia)

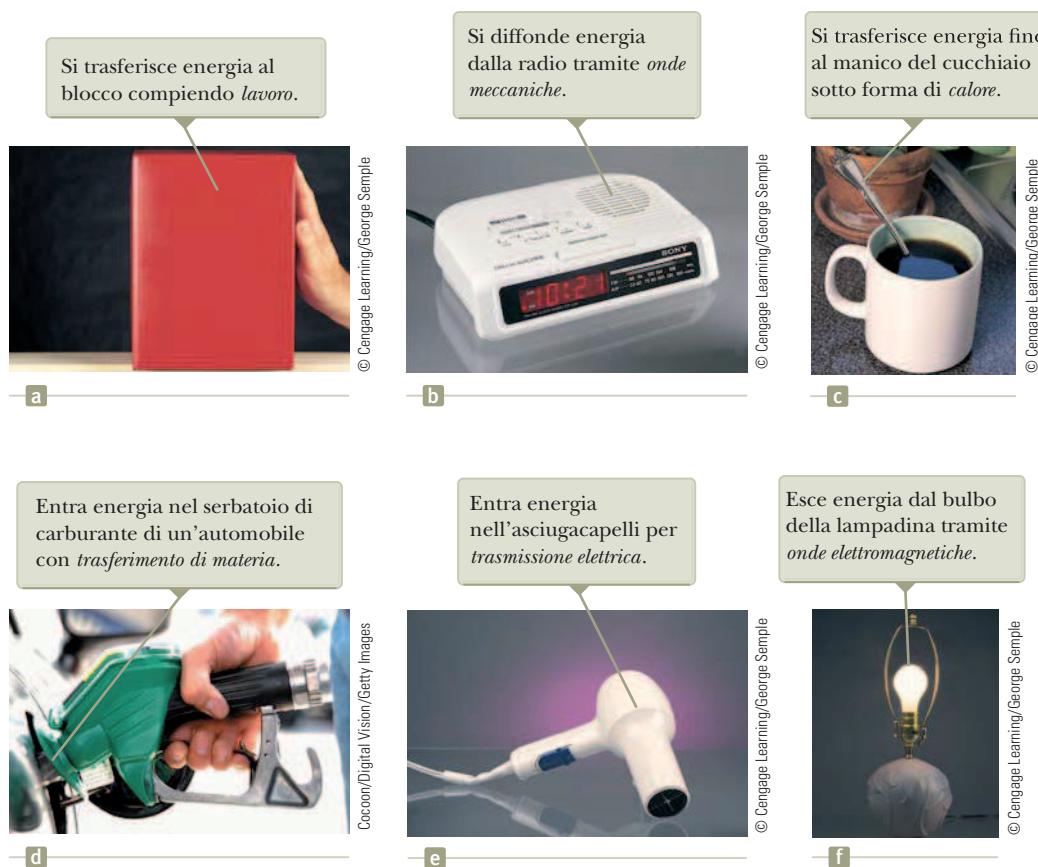
Come abbiamo visto, su un oggetto, rappresentato con il modello della particella, possono agire varie forze che producono un cambiamento nella sua energia cinetica. Se scegliamo l'oggetto come sistema, questa situazione molto semplice è il primo esempio di *sistema non isolato* per cui l'energia varca il contorno del sistema nell'intervallo temporale in cui il sistema interagisce con l'ambiente. Questo scenario è comune nei problemi di fisica. Se un sistema non interagisce con il suo ambiente, è un sistema isolato, che studieremo nel Paragrafo 7.2.

Il teorema dell'energia cinetica del Capitolo 6 è il nostro primo esempio di equazione dell'energia appropriata per un sistema non isolato. Nel caso di quel teorema, l'interazione del sistema con il suo ambiente è il lavoro fatto dalla forza esterna, e la quantità che cambia nel sistema è l'energia cinetica.

Finora, abbiamo visto solamente una via per trasferire energia in un sistema: il lavoro. Citiamo di seguito alcuni altri modi per trasferire energia al o dal sistema. I dettagli di questi processi saranno studiati in altri paragrafi del libro. Illustriamo i meccanismi per trasferire energia nella Figura 7.1 e li riassumiamo come segue.

Il **lavoro**, come abbiamo imparato nel Capitolo 6, è un metodo per trasferire energia a un sistema applicando una forza al sistema in modo tale che il punto d'applicazione della forza subisca uno spostamento (Fig. 7.1a).

Le **onde meccaniche** (Capitoli 13-14) sono un mezzo per trasferire energia permettendo a una perturbazione di propagarsi attraverso l'aria o un altro mezzo. È il modo con cui l'energia (che noi percepiamo come suono) lascia il sistema della nostra radiosveglia attraverso l'altoparlante e entra nelle nostre orecchie per stimolare i processi uditivi (Fig. 7.1b). Altri esempi di onde meccaniche sono le onde sismiche e le onde oceaniche.



**Figura 7.1** Meccanismi di trasferimento di energia. In ciascun caso è indicato il sistema in cui e da cui l'energia è trasferita.

**Prevenire le insidie | 7.1****Il calore non è una forma di energia**

Il termine *calore* è una delle parole usate nel modo più improprio nel linguaggio quotidiano. Il calore è un modo di *trasferire* energia, *non* una forma di immagazzinamento dell'energia. Quindi, frasi come "contenuto di calore", "calore dell'estate" e "il calore scambiato" rappresentano usi della parola che non sono in accordo con la definizione fisica del calore. Si veda il Capitolo 17.

**Il calore** (Capitolo 17) è un meccanismo di trasferimento di energia che è guidato dalla differenza di temperatura tra un sistema e il suo ambiente. Per esempio, immaginiamo di dividere un cucchiaio di metallo in due parti: il manico, che identifichiamo come il sistema, e la porzione immersa in una tazza di caffè, che è la parte che rappresenta l'ambiente (Fig. 7.1c). Il manico del cucchiaio diventa caldo perché elettroni e atomi che si muovono veloci nella porzione immersa urtano contro quelli più lenti nella parte adiacente del manico. Queste particelle si muovono più velocemente a causa delle collisioni e urtano contro il gruppo successivo di particelle lente. Quindi, l'energia interna del manico del cucchiaio aumenta per trasferimento di energia dovuto a queste collisioni.

Il **trasferimento di materia** (Capitolo 17) coinvolge situazioni in cui la materia fisicamente attraversa il contorno del sistema, portando energia con sé. Esempi includono riempire il serbatoio dell'automobile con benzina (Fig. 7.1d) e portare energia alle stanze della casa facendo circolare aria calda proveniente da un bruciatore, un processo detto *convezione*.

La **trasmissione elettrica** (Capitolo 21) coinvolge il trasferimento di energia nel o fuori dal sistema per mezzo di correnti elettriche. È il modo con cui si trasferisce energia al tuo asciugacapelli (Fig. 7.1e), impianto stereo, o ogni altro dispositivo elettrico.

La **radiazione elettromagnetica** (Capitolo 24) si riferisce alle onde elettromagnetiche come la luce (Fig. 7.1f), le microonde, le onde radio che varcano i confini del sistema. Esempi di questo metodo di trasferimento di energia includono il cuocere una patata al forno nel forno a microonde e l'energia luminosa che viaggia dal Sole alla Terra attraverso lo spazio<sup>1</sup>.

Un aspetto centrale dell'approccio energetico è il concetto che non possiamo né creare né distruggere energia, ma che l'energia si *conserva* sempre. Questo concetto è stato messo alla prova in innumerevoli esperimenti, e nessun esperimento ha mai mostrato che questa affermazione sia scorretta. Quindi, **se la quantità totale di energia di un sistema cambia, può solo essere perché dell'energia ha attraversato il confine del sistema tramite un meccanismo di trasferimento come uno di quelli elencati sopra**.

L'energia è una delle diverse grandezze in fisica che si conservano. Vedremo altre grandezze che si conservano nei capitoli seguenti. Ci sono molte grandezze fisiche che non obbediscono a un principio di conservazione. Per esempio, non esiste il principio di conservazione della forza o della velocità. Allo stesso modo, in aree diverse dalla fisica, come nella vita quotidiana, alcune quantità si conservano e altre no. Per esempio, se il sistema è il tuo conto bancario il denaro è una quantità che si conserva. L'unico modo che esiste perché cambi il bilancio del conto è che del denaro attraversi il confine del sistema con depositi o prelievi. D'altra parte, il numero di persone nel sistema nazione non è conservato. Sebbene ci siano persone che attraversano il confine del sistema cambiando così la popolazione totale, la popolazione può anche cambiare a causa delle persone che muoiono e nascono. Anche se non vi fossero persone che attraversano i confini, le nascite e le morti cambierebbero il numero di persone nel sistema. Non esiste un equivalente al nascere e morire nel concetto di energia. L'affermazione generale del principio di **conservazione dell'energia** può esser descritta matematicamente con l'**equazione di conservazione dell'energia**:

► Conservazione dell'energia

$$\Delta E_{\text{sistema}} = \sum T$$

7.1◀

dove  $E_{\text{sistema}}$  è l'energia totale del sistema, che include tutti i possibili modi di immagazzinare energia (cinetica, potenziale, e interna), e  $T$  (per *trasferimento*) è la quantità di energia trasferita attraverso il confine del sistema con un certo meccanismo. Due dei nostri meccanismi di trasferimento hanno notazioni simboliche ben definite. Per il lavoro,  $T_{\text{lavoro}} = W$  come discusso nel Capitolo 6, e per il calore  $T_{\text{calore}} = Q$  come definito nel Capitolo 17 (ora che abbiamo familiarizzato con il concetto di lavoro, possiamo semplificare l'aspetto delle equazioni facendo sì che il semplice simbolo  $W$  rappresenti il lavoro esterno  $W_{\text{est}}$  sul sistema. Per quel che

<sup>1</sup> La radiazione elettromagnetica e il lavoro fatto dalle forze del campo sono gli unici meccanismi di trasferimento energetico che non richiedono la presenza di molecole dell'ambiente al confine del sistema. Quindi, i sistemi circondati dal vuoto (come i pianeti) possono scambiare energia con l'ambiente soltanto con queste due modalità.

riguarda il lavoro interno, useremo sempre  $W_{\text{int}}$  per distinguerlo da  $W$ ). Gli altri quattro membri dell'elenco non hanno simboli particolari, per cui li chiameremo  $T_{\text{OM}}$  (onde meccaniche),  $T_{\text{TM}}$  (trasferimento di materia),  $T_{\text{TE}}$  (trasmissione elettrica), e  $T_{\text{RE}}$  (radiazione elettromagnetica).

L'espansione completa dell'Equazione 7.1 è

$$\Delta K + \Delta U + \Delta E_{\text{int}} = W + Q + T_{\text{OM}} + T_{\text{TM}} + T_{\text{TE}} + T_{\text{RE}}$$

7.2◀

che è la rappresentazione matematica fondamentale della versione energetica del modello di analisi del **sistema non isolato** (vedremo altre versioni del modello per un sistema non isolato, che coinvolgono il momento lineare e il momento angolare, in capitoli seguenti). Nella maggior parte dei casi, l'Equazione 7.2 si riduce a una molto più semplice perché alcuni dei termini sono zero. Se, per un dato sistema, tutti i termini della parte di destra dell'equazione di conservazione dell'energia sono zero, il sistema è un *sistema isolato*, che studieremo nel paragrafo seguente.

L'equazione di conservazione dell'energia non è più complicata in teoria del processo di stabilire il bilancio del tuo conto in banca. Se il conto è il sistema, le variazioni nel bilancio del conto in un dato mese sono la somma di tutti i trasferimenti: depositi, prelievi, emolumenti, interessi, e assegni. Potresti trovar utile pensare all'energia come la *moneta corrente della natura*!

Supponiamo che una forza sia applicata a un sistema non isolato e che il punto di applicazione della forza si muova a causa di uno spostamento. Quindi supponiamo che il solo effetto sul sistema sia un cambiamento nella sua velocità. In questo caso, l'unico meccanismo di trasferimento dell'energia è il lavoro (cosicché la parte destra dell'Eq. 7.2 si riduce solo a  $W$ ) e l'unica forma di energia nel sistema che cambia è l'energia cinetica (cosicché  $\Delta E_{\text{sistema}}$  si riduce solamente a  $\Delta K$ ). L'Equazione 7.2 allora diventa

$$\Delta K = W$$

che è il teorema dell'energia cinetica. Questo teorema è un caso particolare del più generale principio di conservazione dell'energia. Vedremo altri casi più particolari nei prossimi capitoli.

**QUIZ RAPIDO 7.1** Tramite quale meccanismo di trasferimento l'energia entra e esce (a) dalla tua televisione? (b) dal tuo tagliaerba alimentato a benzina? (c) dal tuo temperamatite manuale?

**QUIZ RAPIDO 7.2** Considera un blocco che scorre su una superficie orizzontale dotata di attrito. Ignora ogni rumore che possa fare lo scorrimento. (i) Se il sistema è il *blocco*, questo sistema è (a) isolato (n) non isolato (c) impossibile da determinare (ii) Se il sistema è la *superficie*, descrivi il sistema con lo stesso insieme di possibilità. (iii) Se il sistema è l'insieme *blocco-superficie*, descrivi il sistema con lo stesso insieme di possibilità.

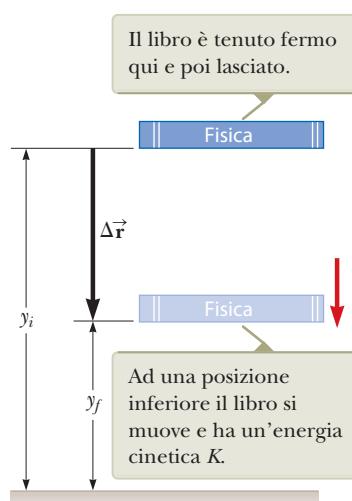
## 7.2 | Modello di analisi: sistema isolato (energia)

In questo paragrafo studiamo un altro scenario molto comune nei problemi di fisica: si sceglie un sistema tale che in alcun modo l'energia attraversi il suo confine. Iniziamo considerando una situazione gravitazionale. Pensiamo al sistema libro-Terra nella Figura 6.15 nel precedente capitolo. Dopo che abbiamo sollevato il libro, c'è energia potenziale gravitazionale immagazzinata nel sistema, che può esser calcolata dal lavoro fatto da un agente esterno sul sistema, usando  $W = \Delta U_g$ .

Spostiamo adesso la nostra attenzione sul lavoro fatto *sul solo libro* dalla forza gravitazionale (Fig. 7.2) quando il libro ricade alla sua altezza originale. Poiché il libro cade da  $y_i$  a  $y_f$ , il lavoro fatto dalla forza gravitazionale sul libro è

$$W_{\text{sul libro}} = (m\vec{g}) \cdot \Delta\vec{r} = (-mg\hat{\mathbf{j}}) \cdot [(y_f - y_i)\hat{\mathbf{j}}] = mg(y_i - y_f)$$

7.3◀



**Figura 7.2** Un libro è lasciato cadere da fermo e cade a causa del lavoro fatto dalla forza di gravità.

# Macchine termiche, entropia e secondo principio della termodinamica

## Schema del capitolo

- 18.1** Macchine termiche e secondo principio della termodinamica
- 18.2** Trasformazioni reversibili e irreversibili
- 18.3** La macchina di Carnot
- 18.4** Pompe di calore e frigoriferi
- 18.5** Un enunciato alternativo del secondo principio
- 18.6** Entropia
- 18.7** Entropia e secondo principio della termodinamica
- 18.8** Variazioni di entropia nelle trasformazioni irreversibili
- 18.9** Collegamento al contesto: l'atmosfera come macchina termica

## SOMMARIO

I primi principi della termodinamica che abbiamo studiato nel Capitolo 17 e la più generale equazione di conservazione dell'energia (Eq. 7.2) sono formulazioni del principio di conservazione dell'energia. Questo principio non pone restrizioni al tipo di trasformazione di energia che può avvenire. Però, nella realtà, si osservano e si possono realizzare soltanto certi tipi di trasformazioni. Consideriamo i seguenti esempi di trasformazioni che sono coerenti con il principio di conservazione dell'energia in entrambi i versi ma che in pratica procedono soltanto in uno di essi.

1. Quando due corpi a temperature diverse sono messi a contatto termico fra loro, l'energia fluisce sempre, sotto forma di calore, dall'oggetto più caldo a quello più freddo. Non osserviamo mai l'energia fluire dall'oggetto più freddo al più caldo.
2. Una palla di gomma che cade per terra rimbalza diverse volte e alla fine si ferma, avendo trasformato l'originaria energia potenziale



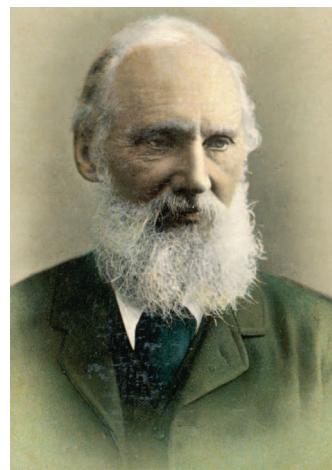
SSPL/The Image Works

Una macchina di Stirling degli inizi del XIX secolo. L'aria viene riscaldata nel cilindro inferiore usando una sorgente esterna. A questo punto l'aria si espande e preme contro un pistone facendolo muovere. L'aria viene poi raffreddata consentendo al ciclo di ripartire nuovamente. Questo è un esempio di macchina termica che studiamo in questo capitolo.

gravitazionale del sistema palla-Terra in energia interna della palla e del suolo. D'altra parte, non capita mai che una palla ferma al suolo trasformi l'energia interna del suolo e inizi a rimbombare spontaneamente.

- Se ossigeno e idrogeno sono mantenuti in due parti separate di un contenitore tramite una membrana e la membrana viene bucata, le molecole d'ossigeno e d'idrogeno si mescolano insieme. Non osserviamo mai una miscela di ossigeno e idrogeno separarsi spontaneamente in parti differenti del contenitore.

Tutte queste sono *trasformazioni irreversibili*; cioè, esse avvengono spontaneamente in una sola direzione. In questo capitolo studieremo un nuovo fondamentale principio che ci permette di capire perché queste trasformazioni avvengano in una sola direzione.<sup>1</sup> Il secondo principio della termodinamica, che è l'obiettivo principale di questo capitolo, stabilisce quali trasformazioni naturali possano e quali non possano avvenire.



© istockphoto.com/ZUL\_09

### Lord Kelvin

Fisico e matematico britannico  
(1824-1907)

Nato come William Thomson a Belfast, nell'Irlanda del Nord, Kelvin fu il primo a proporre l'uso della scala assoluta di temperatura. La scala di temperatura Kelvin è chiamata così in suo onore. Il lavoro di Kelvin in termodinamica condusse all'idea che l'energia non può passare spontaneamente da un corpo più freddo a uno più caldo.

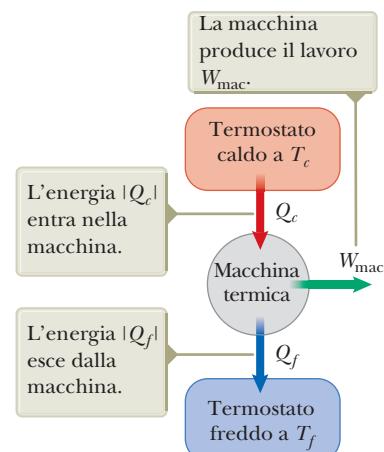
## 18.1 | Macchine termiche e secondo principio della termodinamica

Un dispositivo che risulta molto utile per capire il secondo principio della termodinamica è la macchina termica. Una **macchina termica** è un dispositivo che incamera energia sotto forma di calore<sup>2</sup> e, operando in modo ciclico, espelle una frazione di quell'energia sotto forma di lavoro. Per esempio, in un tipico processo per produrre elettricità in una centrale, viene bruciato carbone o qualche altro combustibile e l'energia interna risultante viene usata per trasformare l'acqua in vapore. Questo vapore viene convogliato alle pale di una turbina, ponendola in rotazione. Infine, l'energia meccanica associata a questa rotazione è utilizzata per far funzionare un generatore elettrico. In un'altra macchina termica, il motore a combustione interna di una automobile, entra energia nel motore con un trasferimento di materia quando il combustibile viene iniettato nel cilindro e una frazione di questa energia viene convertita in energia meccanica.

In generale, una macchina termica fa compiere a una sostanza una trasformazione ciclica<sup>3</sup> durante la quale (1) la sostanza assorbe energia sotto forma di calore da un termostato ad alta temperatura, (2) viene compiuto lavoro dalla macchina e (3) viene ceduta energia dalla macchina a un termostato a più bassa temperatura. Questa energia in uscita è spesso indicata come energia persa, energia di scarico o inquinamento termico. Come esempio, consideriamo il funzionamento di una macchina a vapore nella quale la sostanza impiegata è l'acqua. L'acqua compie un ciclo nel quale prima si trasforma in vapore in una caldaia e poi si espande spingendo un pistone. Dopo che il vapore si condensa in acqua fredda, esso ritorna alla caldaia e il processo ricomincia.

È utile rappresentare schematicamente una macchina termica come nella Figura 18.1. La macchina assorbe una quantità di energia  $|Q_c|$  dal termostato caldo. Per la discussione matematica delle macchine termiche usiamo il valore assoluto per avere valori positivi per tutte le trasformazioni di energia sotto forma di calore mentre usiamo esplicitamente il segno, positivo o negativo, per indicare il verso della trasformazione. La macchina compie il lavoro  $W_{\text{mac}}$  (cosicché un lavoro *negativo*  $W = -W_{\text{mac}}$  è svolto *sulla* macchina) e cede l'energia  $|Q_f|$  al termostato freddo. Poiché la sostanza compie un ciclo, la sua energia interna iniziale e finale è la stessa, per cui  $\Delta E_{\text{int}} = 0$ . Per la macchina si può usare il modello di un sistema non isolato nello stato stazionario. Quindi, dal primo principio,

$$\Delta E_{\text{int}} = 0 = Q + W \rightarrow Q_{\text{tot}} = -W = W_{\text{mac}}$$

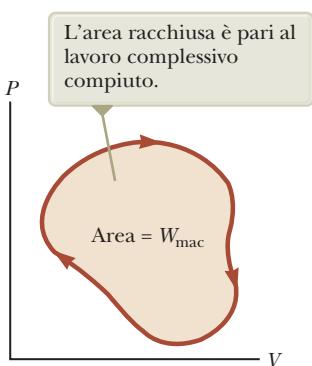


**Figura 18.1** Rappresentazione schematica di una macchina termica.

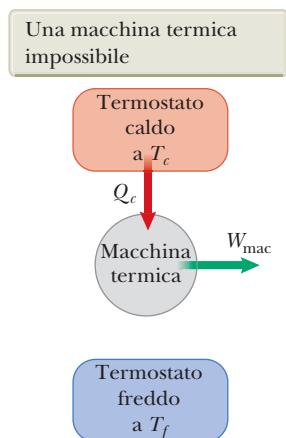
<sup>1</sup> Come vedremo in questo capitolo, è più corretto dire che l'insieme degli eventi con verso temporale invertito è altamente improbabile. Da questo punto di vista, eventi in una direzione sono enormemente più probabili che quelli nel verso opposto.

<sup>2</sup> Noi useremo il calore come modello per il trasferimento di energia in una macchina termica. D'altra parte, altri metodi di trasferimento di energia sono anche possibili nel modello di macchina termica. Ad esempio, come vedremo nel Paragrafo 18.9, l'atmosfera della Terra può essere schematizzata come una macchina termica nella quale il trasferimento di energia in ingresso avviene per mezzo dell'energia elettromagnetica proveniente dal Sole. La macchina termica atmosferica, in uscita, produce la struttura dei venti nell'atmosfera.

<sup>3</sup> Un motore d'automobile non è, a rigore, una macchina termica secondo la definizione di processo ciclico che se ne è data. Infatti, la sostanza (la miscela di aria-benzina) è sottoposta ad un solo ciclo ed è poi espulsa attraverso il sistema di scarico.



**Figura 18.2** Diagramma PV per un processo ciclico arbitrario.



**Figura 18.3** Diagramma schematico di una macchina termica che prende energia da un termostato caldo e la converte tutta in lavoro. È impossibile costruire tale motore perfetto.

e vediamo che il lavoro  $W_{\text{mac}}$  compiuto dalla macchina termica è uguale all'energia totale assorbita dalla macchina. Come possiamo vedere dalla Figura 18.1,  $Q_{\text{tot}} = |Q_c| - |Q_f|$ . Quindi,

$$W_{\text{mac}} = |Q_c| - |Q_f| \quad 18.1$$

Se la sostanza impiegata è un gas, il lavoro totale svolto in una trasformazione ciclica è l'area racchiusa dalla curva che rappresenta la trasformazione in un diagramma PV. Quest'area è mostrata per una trasformazione ciclica arbitraria nella Figura 18.2.

Il **rendimento**,  $e$ , di una macchina termica è definito come il rapporto fra il lavoro svolto dalla macchina e l'energia assorbita alla temperatura più alta durante un ciclo:

$$e = \frac{W_{\text{mac}}}{|Q_c|} = \frac{|Q_c| - |Q_f|}{|Q_c|} = 1 - \frac{|Q_f|}{|Q_c|} \quad 18.2$$

Possiamo considerare il rendimento come il rapporto fra ciò che si ottiene (trasferimento di energia sotto forma di lavoro) e ciò che si spende (trasferimento di energia dal termostato di alta temperatura). L'Equazione 18.2 mostra che una macchina termica avrebbe un rendimento del 100% ( $e = 1$ ) soltanto se  $Q_f = 0$  (cioè se non venisse trasferita energia al termostato freddo). In altre parole, una macchina termica con rendimento unitario dovrebbe trasformare tutta l'energia assorbita in lavoro meccanico.

L'**enunciato di Kelvin-Planck del secondo principio della termodinamica** può esprimersi come segue:

È impossibile costruire una macchina termica che, operando in un ciclo, abbia come unico risultato quello di assorbire energia da un termostato e di produrre una uguale quantità di lavoro.

L'essenza di questo enunciato del secondo principio è che è teoricamente impossibile costruire una macchina come quella della Figura 18.3 che lavora col 100% di rendimento. Tutte le macchine devono scaricare una parte di energia  $Q_f$  nell'ambiente.

**QUIZ RAPIDO 18.1** L'energia in ingresso ad una macchina è 3.00 volte maggiore del lavoro che produce. (i) Qual è il suo rendimento? (a) 3.00 (b) 1.00 (c) 0.333 (d) impossibile da calcolare (ii) Che frazione dell'energia in ingresso viene ceduta al termostato freddo? (a) 0.333 (b) 0.667 (c) 1.00 (d) impossibile da determinare.

### Esempio 18.1 | Rendimento di un motore

Un motore compie una trasformazione assorbendo  $2.00 \times 10^3 \text{ J}$  di energia da un termostato caldo durante un ciclo e cedendo  $1.50 \times 10^3 \text{ J}$  a un termostato freddo.

**(A)** Trovare il rendimento del motore.

#### SOLUZIONE

**Concettualizzazione** Riguardate la Figura 18.1; pensate all'energia che entra nel motore dal termostato caldo e che si divide in una parte che produce lavoro e un'altra parte che viene ceduta sotto forma di calore al termostato freddo.

**Classificazione** Questo esempio comporta la valutazione di quantità dalle equazioni introdotte in questo paragrafo, sicché lo consideriamo come un problema da risolvere per sostituzione.

Ricaviamo il rendimento del motore usando l'Equazione 18.2:  $e = 1 - \frac{|Q_f|}{|Q_c|} = 1 - \frac{1.50 \times 10^3 \text{ J}}{2.00 \times 10^3 \text{ J}} = 0.250, \text{ o } 25.0\%$

**(B)** Quanto lavoro compie questo motore in un ciclo?

#### SOLUZIONE

Il lavoro svolto è la differenza fra l'energia in entrata e in uscita:  $W_{\text{mac}} = |Q_c| - |Q_f| = 2.00 \times 10^3 \text{ J} - 1.50 \times 10^3 \text{ J} = 5.0 \times 10^2 \text{ J}$

**18.1 cont.**

**E se...?** Supponiamo che ci sia chiesta la potenza in uscita di questo motore. Abbiamo sufficienti informazioni per rispondere a questa domanda?

**Risposta** No, non abbiamo sufficienti informazioni. La potenza di un motore indica la quantità di lavoro compiuto dal motore nell'unità di tempo. Conosciamo quanto lavoro viene compiuto in un ciclo ma non abbiamo informazione riguardo la durata temporale di un ciclo. Se ci dicessero che il motore compie 2 000 rpm (giri per minuto), potremmo ricavare la potenza legandola al periodo di rotazione  $T$  del motore. Assumendo che c'è un ciclo termodinamico per ogni rivoluzione, la potenza è

$$P = \frac{W_{\text{mac}}}{T} = \frac{5.0 \times 10^2 \text{ J}}{\left(\frac{1}{2\,000} \text{ min}\right)} \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}\right) = 1.7 \times 10^4 \text{ W}$$

## 18.2 | Trasformazioni reversibili e irreversibili

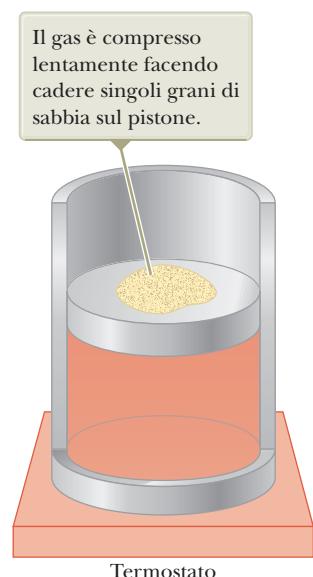
Nel prossimo paragrafo discuteremo una macchina termica teorica che è la macchina che ha il più alto rendimento possibile. Allo scopo di capirne la natura, esamineremo prima il significato delle trasformazioni reversibili e irreversibili. Una trasformazione si dice **reversibile** quando il sistema può ritornare nelle condizioni iniziali lungo lo stesso percorso e se ogni punto lungo il cammino costituisce uno stato di equilibrio. Una trasformazione che non soddisfa tali requisiti è **irreversibile**.

La maggior parte delle trasformazioni naturali sono irreversibili; la trasformazione reversibile è un'idealizzazione. Le tre trasformazioni descritte nell'introduzione di questo capitolo sono irreversibili, e osserviamo che esse procedono soltanto in un verso. L'espansione libera di un gas discussa nel Paragrafo 17.6 è irreversibile. Quando la membrana viene rimossa, il gas si precipita nella metà vuota del contenitore mentre l'ambiente circostante non varia. Non importa quanto a lungo osserviamo, ma non vedremo mai il gas nell'intero volume ritornare a stare solo metà del volume. Il solo modo che abbiamo perché ciò accada è interagire col gas, per esempio spingendolo all'interno con un pistone, ma ciò produrrebbe una modifica dell'ambiente circostante.

Se una trasformazione reale avviene molto lentamente in modo che il sistema sia sempre molto vicino all'equilibrio, la trasformazione può essere considerata reversibile. Per esempio, immaginiamo di comprimere un gas molto lentamente facendo cadere qualche granello di sabbia su un pistone privo di attrito come in Figura 18.4. La pressione, il volume e la temperatura del gas sono ben definiti durante questa compressione isoterma. Ciascun granello di sabbia aggiunto rappresenta un piccolo cambiamento verso un nuovo stato di equilibrio. La trasformazione può essere invertita per mezzo di una lenta rimozione dei granelli di sabbia dal pistone.

**Prevenire le insidie | 18.1**  
**I processi reali sono irreversibili**

Il processo reversibile è un'idealizzazione. Tutti i processi reali sulla Terra sono irreversibili.



**Figura 18.4** Un metodo per comprimere un gas in un processo isoterma reversibile.

## 18.3 | La macchina di Carnot

Nel 1824, un ingegnere francese di nome Sadi Carnot descrisse una macchina teorica, che ora si chiama **macchina di Carnot**, che è di grande importanza sia dal punto di vista pratico che teorico. Egli mostrò che una macchina termica che opera fra due termostati in un ciclo ideale reversibile, detto **ciclo di Carnot**, è la macchina con il più alto rendimento possibile. Una tale macchina ideale determina un limite superiore per il rendimento di tutte le macchine reali. Cioè, il lavoro complessivo svolto da una sostanza sottoposta a un ciclo di Carnot è la massima quantità di lavoro possibile per una data quantità di energia fornita alla sostanza dal termostato a temperatura più alta.

Per descrivere il ciclo di Carnot, assumeremo che la sostanza che compie il lavoro nella macchina sia un gas perfetto contenuto in un cilindro chiuso da un pistone mobile. Le pareti del cilindro e il pistone sono termicamente isolati. I quattro stadi del ciclo di Carnot sono mostrati nella Figura 18.5 (pag. 590); la Figura 18.6 (pag. 590) rappresenta il diagramma  $PV$  del ciclo che consiste di due trasformazioni adiabatiche e di due isoterme, tutte reversibili:

1. La trasformazione  $A \rightarrow B$  (Fig. 18.5a) è un'espansione isoterma alla temperatura  $T_c$ . Il gas è mantenuto a contatto termico con un termostato alla temperatura

**Prevenire le insidie | 18.2**  
**Non cercate di comprare una macchina di Carnot**

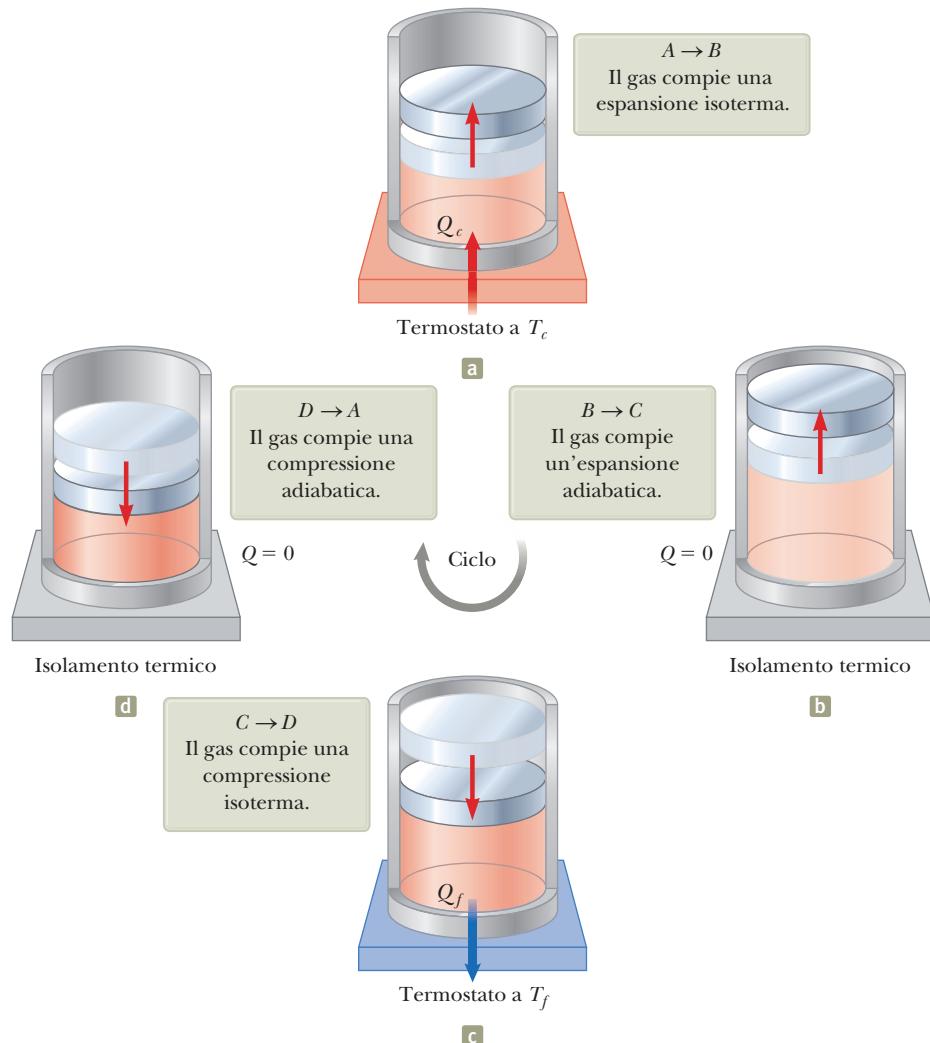
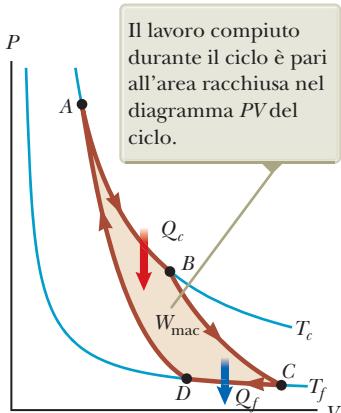
La macchina di Carnot è un'idealizzazione, cosicché non bisogna aspettarsi che essa venga sviluppata e messa in commercio. Studiamo la macchina di Carnot solo per poter fare considerazioni teoriche.



© INTERFOTO/Alamy

**Sadi Carnot**

**Ingegnere francese (1796-1832)**  
Fisico francese, Carnot fu il primo a mostrare la relazione quantitativa fra lavoro e calore. Nel 1824 pubblicò il suo unico lavoro, *Riflessioni sulla potenza motrice del calore*, in cui analizzò criticamente l'importanza industriale, politica, ed economica della macchina a vapore. In esso, egli definì il lavoro come "peso sollevato ad una altezza".

**Figura 18.5** Il ciclo di Carnot. Le lettere A, B, C e D si riferiscono agli stati del gas mostrati nella Figura 18.6. I vettori sul pistone indicano il verso del moto del pistone durante ciascuna trasformazione.**Figura 18.6** Il diagramma  $PV$  per un ciclo di Carnot. Il lavoro complessivo compiuto  $W_{mac}$  è pari all'energia trasferita nella macchina di Carnot in un ciclo,  $|Q_c| - |Q_f|$ .

$T_c$  (Fig. 18.5a). Durante l'espansione il gas assorbe l'energia  $|Q_c|$  dal termostato attraverso la base del cilindro e compie il lavoro  $W_{AB}$  sollevando il pistone.

- Nella trasformazione  $B \rightarrow C$  (Fig. 18.5b), la base del cilindro viene isolata termicamente e il gas si espande adiabaticamente, cioè non avviene alcuno scambio di energia sotto forma di calore. Durante l'espansione, la temperatura si abbassa dal valore  $T_c$  al valore  $T_f$  e il gas compie il lavoro  $W_{BC}$  sollevando il pistone.
- Nella trasformazione  $C \rightarrow D$  (Fig. 18.5c), il gas è posto in contatto termico con il termostato a temperatura  $T_f$  ed è compresso isotermicamente alla temperatura  $T_f$ . Durante questo tempo, il gas cede la quantità di energia  $|Q_f|$  al termostato e viene compiuto sul gas il lavoro  $W_{CD}$ .
- Nella trasformazione finale,  $D \rightarrow A$  (Fig. 18.5d), la base del cilindro viene di nuovo isolata termicamente e il gas è compresso adiabaticamente. La temperatura del gas aumenta al valore  $T_c$ , e il lavoro svolto sul gas è  $W_{DA}$ .

Carnot ha dimostrato che per questo ciclo,

$$\frac{|Q_f|}{|Q_c|} = \frac{T_f}{T_c} \quad 18.3$$

Quindi, usando l'Equazione 18.2, il rendimento di una macchina di Carnot è

$$\epsilon_C = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

18.4





SERWAY • JEWETT

# Principi di Fisica



€ 55,00

