

Comprende



versione Ebook

e Software di simulazione

Serway • Jewett

# Fisica

## per Scienze e Ingegneria

Volume Secondo

VI Edizione





# Accedi all'ebook e ai contenuti digitali

**Espandi le tue risorse**  
un libro che **non pesa**  
e si **adatta** alle dimensioni  
del **tuo lettore!**



Utilizza il codice personale contenuto nel riquadro per registrarti al sito **edises.it** e attiva la tua **area riservata**. Potrai accedere alla **versione digitale** del testo e a ulteriore **materiale didattico**.

Scopri il tuo **codice personale** grattando delicatamente la superficie

Il volume NON può essere venduto, né restituito, se il codice personale risulta visibile.  
L'accesso al materiale didattico sarà consentito **per 18 mesi**.

Per attivare i **servizi riservati**, collegati al sito **edises.it** e segui queste semplici istruzioni

## Se sei registrato al sito

- clicca su *Accedi al materiale didattico*
- inserisci email e password
- inserisci le ultime 4 cifre del codice ISBN, riportato in basso a destra sul retro di copertina
- inserisci il tuo **codice personale** per essere reindirizzato automaticamente all'area riservata

## Se non sei già registrato al sito

- clicca su *Accedi al materiale didattico*
- registrati al sito **edises.it**
- attendi l'email di conferma per perfezionare la registrazione
- torna sul sito **edises.it** e segui la procedura già descritta per *utenti registrati*



Ulteriori materiali e strumenti didattici sono accessibili dalla propria **area riservata** secondo la procedura indicata nel frontespizio.

Dalla sezione **materiali e servizi** della tua area riservata potrai accedere a:

- **Ebook:** versione digitale del testo in formato epub, standard dinamico che organizza il flusso di testo in base al dispositivo sul quale viene visualizzato. Fruibile mediante l'applicazione gratuita BookShelf, consente una visualizzazione ottimale su lettori e-reader, tablet, smartphone, iphone, desktop, Android, Apple e Kindle Fire. Sono qui forniti in lingua originale sotto forma di appendice gli svolgimenti dei problemi con numero pari e dei problemi impegnativi.
- **Software di simulazione:** un vastissimo database di quesiti a risposta multipla per effettuare esercitazioni sull'**intero programma** o su **argomenti specifici**.

L'accesso ai contenuti digitali sarà consentito per **18 mesi**.

# Fisica

VI  
EDIZIONE

## per Scienze e Ingegneria

VOLUME II

**Raymond A. Serway**  
*Emeritus, James Madison University*

**John W. Jewett, Jr.**  
*Emeritus, California State  
Polytechnic University, Pomona*

Con la collaborazione di Vahé Peroomian  
University of Southern California

### Riguardo alla copertina

La copertina mostra un drone a sei eliche che trasporta un cavo pilota lungo quasi 5 chilometri attraverso la profonda gola in cui scorre il fiume Dadu durante il progetto di costruzione del ponte di Xingkang nella provincia di Sichuan, in Cina. Questo metodo evita la necessità di utilizzare barche sul fiume a rapida corrente o altri metodi come elicotteri pilotati e piccoli razzi. Inoltre, riduce i costi per la posa del cavo a circa il 20% di quelli dei metodi tradizionali. Una volta posato il cavo pilota, esso può essere utilizzato per tirare cavi più pesanti attraverso la gola.



*Titolo originale:*

Raymond A. Serway, John W. Jewett, Jr

**Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics** – Tenth Edition

Copyright © 2019, 2014 Cengage

**Fisica per Scienze e Ingegneria** – Volume II – VI Edizione

Copyright © 2023, EdiSES Edizioni S.r.l. – Napoli

9 8 7 6 5 4 3 2 1 0  
2027 2026 2025 2024 2023

*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

*Fotocomposizione*

V colore di Francesco Omaggio – Pordenone

*Stampato presso la*

INDUSTRIA Grafica Vulcanica S.r.l. – Nola (NA)

*per conto della*

EdiSES Edizioni S.r.l. – Piazza Dante, 89 – Napoli

**www.edises.it**

**assistenza.edises.it**

ISBN 978 88 3623 1331

---

I curatori, l'editore e tutti coloro in qualche modo coinvolti nella preparazione o pubblicazione di quest'opera hanno posto il massimo impegno per garantire che le informazioni ivi contenute siano corrette, compatibilmente con le conoscenze disponibili al momento della stampa; essi, tuttavia, non possono essere ritenuti responsabili dei risultati dell'utilizzo di tali informazioni e restano a disposizione per integrare la citazione delle fonti, qualora incompleta o imprecisa. Realizzare un libro è un'operazione complessa e, nonostante la cura e l'attenzione poste dagli autori e da tutti gli addetti coinvolti nella lavorazione dei testi, l'esperienza ci insegna che è praticamente impossibile pubblicare un volume privo di imprecisioni. Saremo grati ai lettori che vorranno inviarci le loro segnalazioni e/o suggerimenti migliorativi sulla piattaforma *assistenza.edises.it*.

# Sommario

## PARTE 4

### Elettricità e magnetismo 587

- 22** Campi elettrici 588
- 23** Distribuzioni continue di carica e legge di Gauss 615
- 24** Potenziale elettrico 636
- 25** Capacità e dielettrici 663
- 26** Corrente e resistenza 691
- 27** Circuiti in corrente continua 713
- 28** Campi magnetici 742
- 29** Sorgenti di campo magnetico 771
- 30** Legge di Faraday 797
- 31** Induttanza 824
- 32** Circuiti in corrente alternata 847
- 33** Onde elettromagnetiche 873

## PARTE 5

### Luce ed ottica 897

- 34** Natura della luce e leggi dell'ottica geometrica 898
- 35** Formazione delle immagini 925
- 36** Ottica ondulatoria 962
- 37** Figure di diffrazione e polarizzazione 983

## PARTE 6

### Fisica moderna 1011

- 38** Relatività 1012

# Indice generale

Autori VII  
Prefazione XI  
Per gli studenti XXIII

## PARTE 4 Elettricità e magnetismo 587

### 22 Campi elettrici 588

- 22.1 Proprietà delle cariche elettriche 589
- 22.2 Corpi caricati per induzione 591
- 22.3 Legge di Coulomb 593
- 22.4 Modello di analisi: particella in un campo (elettrico) 598
- 22.5 Linee di campo elettrico 603
- 22.6 Moto di una particella carica in un campo elettrico uniforme 605

### 23 Distribuzioni continue di carica e legge di Gauss 615

- 23.1 Campo elettrico di una distribuzione continua di carica 616
- 23.2 Flusso elettrico 620
- 23.3 Legge di Gauss 623
- 23.4 Applicazione della legge di Gauss a varie distribuzioni di carica 625

### 24 Potenziale elettrico 636

- 24.1 Potenziale elettrico e differenza di potenziale 637
- 24.2 Differenza di potenziale in un campo elettrico uniforme 639
- 24.3 Potenziale elettrico ed energia potenziale dovuti a cariche puntiformi 642
- 24.4 Ricavare il valore del campo elettrico dal potenziale elettrico 645
- 24.5 Potenziale elettrico dovuto a distribuzioni continue di carica 646
- 24.6 Conduttori in equilibrio elettrostatico 651

### 25 Capacità e dielettrici 663

- 25.1 Definizione di capacità 664
- 25.2 Calcolo della capacità 665
- 25.3 Combinazioni di condensatori 668
- 25.4 Energia immagazzinata in un condensatore carico 672
- 25.5 Condensatori con dielettrici 676
- 25.6 Dipolo elettrico in un campo elettrico 678
- 25.7 Una descrizione atomica dei dielettrici 681

### 26 Corrente e resistenza 691

- 26.1 Corrente elettrica 692
- 26.2 Resistenza 694
- 26.3 Un modello per la conduzione elettrica 699
- 26.4 Resistenza e temperatura 701
- 26.5 Superconduttori 702
- 26.6 Potenza elettrica 703

### 27 Circuiti in corrente continua 713

- 27.1 Forza elettromotrice 714
- 27.2 Resistori in serie e in parallelo 716
- 27.3 Leggi di Kirchhoff 723
- 27.4 Circuiti RC 726
- 27.5 Impianti elettrici e sicurezza elettrica nelle abitazioni 732

### 28 Campi magnetici 742

- 28.1 Modello di analisi: particella in un campo (magnetico) 743
- 28.2 Moto di una particella carica in un campo magnetico uniforme 748
- 28.3 Particelle cariche in moto in un campo magnetico: applicazioni 752
- 28.4 Forza magnetica agente su un conduttore percorso da corrente 755
- 28.5 Momento meccanico su una spira percorsa da corrente in un campo magnetico uniforme 757
- 28.6 Effetto Hall 761

### 29 Sorgenti di campo magnetico 771

- 29.1 Legge di Biot-Savart 772
- 29.2 Forza magnetica fra due conduttori paralleli 777
- 29.3 Legge di Ampère 779
- 29.4 Campo magnetico di un solenoide 782
- 29.5 Legge di Gauss nel magnetismo 784
- 29.6 Magnetismo nella materia 786

### 30 Legge di Faraday 797

- 30.1 Legge dell'induzione di Faraday 798
- 30.2 F.e.m. nei circuiti in moto 801
- 30.3 Legge di Lenz 805
- 30.4 Forma generale della legge di Faraday 808
- 30.5 Generatori e motori 810
- 30.6 Correnti parassite 814

### 31 Induttanza 824

- 31.1 Autoinduzione e induttanza 825
- 31.2 Circuiti RL 827
- 31.3 Energia in un campo magnetico 830
- 31.4 Mutua induttanza 832
- 31.5 Oscillazioni in un circuito LC 834
- 31.6 Circuito RLC 837

**32 Circuiti in corrente alternata 847**

- 32.1 Generatori di tensione alternata 848
- 32.2 Resistori in un circuito in c.a. 848
- 32.3 Induttori in un circuito in c.a. 851
- 32.4 Condensatori in un circuito in c.a. 854
- 32.5 Circuito *RLC* in serie 856
- 32.6 Potenza in un circuito in c.a. 859
- 32.7 Risonanza in un circuito *RLC* in serie 861
- 32.8 Trasformatore e trasmissione di potenza 863

**33 Onde elettromagnetiche 873**

- 33.1 Corrente di spostamento e legge di Ampère generalizzata 874
- 33.2 Equazioni di Maxwell e scoperte di Hertz 876
- 33.3 Onde elettromagnetiche piane 878
- 33.4 Energia trasportata dalle onde elettromagnetiche 882
- 33.5 Quantità di moto e pressione di radiazione 884
- 33.6 Produzione di onde elettromagnetiche da un'antenna 886
- 33.7 Spettro delle onde elettromagnetiche 887

**PARTE 5****Luce ed ottica 897****34 Natura della luce e leggi dell'ottica geometrica 898**

- 34.1 Natura della luce 899
- 34.2 Approssimazione dei raggi nell'ottica geometrica 901
- 34.3 Modello di analisi: riflessione delle onde 902
- 34.4 Modello di analisi: rifrazione delle onde 905
- 34.5 Principio di Huygens 911
- 34.6 Dispersione 912
- 34.7 Riflessione interna totale 914

**35 Formazione delle immagini 925**

- 35.1 Immagini formate da specchi piani 926
- 35.2 Immagini formate da specchi sferici 928
- 35.3 Immagini formate per rifrazione 935
- 35.4 Immagini formate da lenti sottili 939
- 35.5 Aberrazioni delle lenti 947
- 35.6 Strumenti ottici 947

**36 Ottica ondulatoria 962**

- 36.1 Esperimento di Young della doppia fenditura 963
- 36.2 Modello di analisi: interferenza delle onde 965
- 36.3 Distribuzione di intensità nella figura di interferenza da doppia fenditura 968
- 36.4 Variazione di fase dovuta alla riflessione 969
- 36.5 Interferenza in lame sottili 970
- 36.6 Interferometro di Michelson 973

**37 Figure di diffrazione e polarizzazione 983**

- 37.1 Introduzione alle figure di diffrazione 984
- 37.2 Figure di diffrazione da fenditure sottili 985
- 37.3 Risoluzione di singole fenditure e di aperture circolari 988
- 37.4 Reticolo di diffrazione 992
- 37.5 Diffrazione di raggi X da cristalli 996
- 37.6 Polarizzazione delle onde luminose 998

**PARTE 6****Fisica moderna 1011****38 Relatività 1012**

- 38.1 Principio di relatività galileiana 1013
- 38.2 Esperimento di Michelson-Morley 1016
- 38.3 Principio di relatività di Einstein 1018
- 38.4 Conseguenze della teoria della relatività ristretta 1019
- 38.5 Equazioni di trasformazione di Lorentz 1030
- 38.6 Equazioni di trasformazione delle velocità di Lorentz 1031
- 38.7 Quantità di moto relativistica 1034
- 38.8 Energia relativistica 1035
- 38.9 Teoria della relatività generale 1039

**Appendici****A Tabelle A-1**

- Tabella A.1** Fattori di conversione A-1
- Tabella A.2** Simboli, dimensioni e unità delle grandezze fisiche A-2

**B Richiami di analisi matematica A-4**

- B.1** Notazione scientifica A-4
- B.2** Algebra A-5
- B.3** Geometria A-10
- B.4** Trigonometria A-11
- B.5** Sviluppo in serie A-13
- B.6** Calcolo differenziale A-13
- B.7** Calcolo integrale A-16
- B.8** Propagazione degli errori A-20

**C Tavola periodica degli elementi A-22****D Unità SI A-24**

- D.1** Unità SI fondamentali A-24
- D.2** Unità SI derivate A-24

**Risposte ai quiz e ai problemi con numero dispari A-25****Indice analitico I-1**



# 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 e 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 e amico Sam Marshall. È coautore, oltre che delle precedenti edizioni di questo testo, di *College Physics*, undicesima edizione, *Principles of Physics*, 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 e 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 e dieci nipoti.



**John W. Jewett, Jr.** ha conseguito la laurea in Fisica alla Drexel University e il dottorato alla 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 del 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 e 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 *Principles of Physics*, 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 e i nipotini.



# Curatori

## Traduzione a cura di:

**Antoniangelo Agnesi** *Università degli Studi di Pavia*

**Germano Bonomi** *Università degli Studi di Brescia*

**Caterina Branca** *Università degli Studi di Messina*

**Simone Donati** *Università degli Studi di Pisa*

**Donato Vincenzi** *Università degli Studi di Ferrara*

**Dario Zappa** *Università degli Studi di Brescia*

## Hanno collaborato alla precedente edizione:

Antonello Andreone, Carlo Angelini, Claudio Baffi, Davide Contini, Giuseppe Iaselli,  
Vittorio Magni, Pasquina Marzola, Marco Maria Massai, Francesca Monti,  
Mauro Morganti, Matteo Luca Ruggiero, Adele Sassella, Alessandro Torricelli



# Prefazione

**N**ella stesura di questa edizione di *Fisica per Scienze e Ingegneria* abbiamo proseguito nello sforzo di rendere sempre più chiara l'esposizione degli argomenti e di introdurre nuovi strumenti pedagogici, nel tentativo di migliorare ancora i processi di apprendimento e di insegnamento. Per raffinare ulteriormente il testo e andare sempre più incontro alle necessità degli studenti e degli insegnanti abbiamo fatto tesoro delle reazioni di chi ha utilizzato la precedente edizione e dei suggerimenti dei revisori.

Questo libro è pensato come libro di testo per un corso iniziale di base per studenti di scienze o di ingegneria. Il contenuto completo del libro nella sua versione estesa può essere coperto in un corso di tre semestri. È però anche possibile utilizzare solo una parte del materiale, semplicemente omettendo alcuni capitoli o paragrafi scelti opportunamente. Lo studente che inizi a seguire questo corso si troverebbe in una situazione ideale se fosse già in possesso di quelle conoscenze matematiche che normalmente si acquisiscono in un corso semestrale di calcolo differenziale. Se questo non fosse possibile, lo studente dovrebbe seguire il corso di matematica in parallelo al corso di fisica.

## Contenuti

Il materiale di questo libro copre gli argomenti di base della fisica classica e fornisce una introduzione alla fisica moderna. Il libro è diviso in sei parti. La Parte 1 (Capitoli da 1 a 14) espone i fondamenti della meccanica newtoniana e della fisica dei fluidi; la Parte 2 (Capitoli da 15 a 17) riguarda le oscillazioni, le onde meccaniche ed il suono; la Parte 3 (Capitoli da 18 a 21) è dedicata al calore e alla termodinamica; la Parte 4 (Capitoli da 22 a 33) tratta dell'elettricità e del magnetismo; la Parte 5 (Capitoli da 34 a 37) si occupa della luce e dell'ottica; la Parte 6 (Capitolo 38) affronta la relatività e la fisica moderna.

## Obiettivi

Due sono gli obiettivi principali che questo testo di introduzione alla fisica si propone: il primo è quello di dare allo studente una presentazione chiara e logica dei fondamenti e dei concetti di base e il secondo è quello di rendere più solida la comprensione di questi attraverso una scelta molto ampia di applicazioni che siano interessanti e realistiche. Per questo abbiamo voluto continuamente dare risalto sia agli argomenti fisici di base sia alla metodologia di risoluzione dei problemi. Contemporaneamente abbiamo cercato di motivare lo studente presentandogli degli esempi pratici, che dimostrano il ruolo rivestito dalla fisica in altre discipline, come l'ingegneria, la chimica e la medicina.

## Novità di questa edizione

La nuova edizione di questo testo contiene un gran numero di migliorie e di cambiamenti. Alcune delle novità sono il frutto della nostra esperienza personale e delle tendenze più recenti della didattica della scienza. Altri cambiamenti sono stati introdotti in seguito ai commenti e ai suggerimenti avanzati dagli utilizzatori della precedente edizione e dai revisori del manoscritto. Quello che segue è un elenco delle novità più importanti contenute in questa edizione.

## Nuovi elementi di valutazione

***Nuovi problemi rappresentativi del contesto.*** I problemi rappresentativi del contesto (identificati con un'icona **RC**) riguardano sempre "te" in veste di protagonista e hanno una connessione con il mondo reale invece di discutere di blocchi su piani o palle su corde. Sono strutturati come una breve storia e potrebbero

non identificare esplicitamente la variabile che deve essere valutata. I problemi rappresentativi del contesto: possono essere correlati alla storia introduttiva del capitolo; potrebbero descrivere scenari che coinvolgono un “testimone esperto”; permettono agli studenti di andare oltre la manipolazione matematica progettando una argomentazione basata sui risultati matematici, o chiedono di prendere decisioni in situazioni reali. Di seguito è riportato un esempio di un nuovo problema rappresentativo del contesto:

**20.** C’è un evento 5K in arrivo nella tua città. Parlando con tua **RC** nonna, che usa uno scooter elettrico per spostarsi, dice che vorrebbe accompagnarti sul suo scooter mentre percorri a piedi i 5.00 km. Il manuale fornito con il suo scooter afferma che la batteria completamente carica è in grado di fornire 120 Wh di energia prima di esaurirsi. In preparazione alla gara, fai un “test drive”: partendo con la batteria completamente carica, tua nonna guida accanto a te mentre percorri 5.00 km in piano. Al termine della camminata, l’indicatore di consumo mostra che la batteria ha ancora il 40.0% dell’energia iniziale. Sai anche che il peso combinato dello scooter e di tua nonna è di 890 N. Pochi giorni dopo, confidente che la batteria abbia sufficiente energia, tu e tua nonna andate all’evento 5K. Non sapevi però che il percorso della 5K non è in piano, ma è tutto in salita e termina ad una quota più alta rispetto alla linea di partenza. Un ufficiale di gara ti dice che il dislivello totale in verticale sul percorso è di 150 m. Tua nonna dovrebbe accompagnarti nella camminata o rimarrà bloccata perché la batteria esaurirà l’energia? Si assuma che l’unica differenza tra il tuo test drive e l’evento reale sia il dislivello verticale.

**Nuovi problemi e attività di Riflettere-Discutere-Condividere.** I problemi e le attività di Riflettere-Discutere-Condividere sono simili ai problemi rappresentativi del contesto, ma tendono a trarre maggior beneficio dalla discussione di gruppo poiché la soluzione non è così semplice come per un problema a singolo concetto. Alcuni problemi di Riflettere-Discutere-Condividere richiedono al gruppo di discutere e prendere decisioni; altri sono resi più impegnativi dal fatto che alcune informazioni non sono e non possono essere conosciute. Tutti i capitoli del testo hanno almeno un problema o un’attività di Riflettere-Discutere-Condividere. Di seguito sono riportati un esempio di un problema di Riflettere-Discutere-Condividere e un’attività di Riflettere-Discutere-Condividere:

1. Lavori come fattorino per un negozio di latticini. Nella parte posteriore del tuo camioncino c’è una cassa di uova. L’azienda lattiero-casearia ha esaurito le corde elastiche, quindi la cassa non è legata. Ti è stato detto di guidare con attenzione perché il coefficiente di attrito statico tra la cassa e il pianale del camion è 0.600. Non sei preoccupato, perché stai percorrendo una strada che appare perfettamente dritta. A causa della tua sicurezza e disattenzione, la tua velocità è aumentata fino a 45.0 mi/h. Improvvisamente, vedi una curva davanti a te con un segnale di avvertimento che dice: “Pericolo: curva non inclinata con raggio di curvatura 35.0 m”. Sei a 15.0 m dall’inizio della curva. Cosa puoi fare per salvare le uova: (i) prendere la curva a 45.0 mi/h, (ii) frenare fino a fermarti prima di entrare nella curva per pensarci, o (iii) rallentare per prendere la curva più lentamente? Discuti queste opzioni nel tuo gruppo e determina se esiste la migliore linea d’azione.

3. **ATTIVITÀ** (a) Mettete dieci penny su un metro rigido orizzontale, con un penny a 10 cm, 20 cm, 30 cm, ecc., fino a 100 cm. Prendete con cura il metro, tenendolo in posizione orizzontale, e chiedete a un membro del gruppo di effettuare una registrazione video utilizzando uno smartphone. Mentre la registrazione video è in corso, rilasciare l’estremità da 100 cm del metro rigido mentre l’estremità da 0 cm poggia sul dito di qualcuno o sul bordo della scrivania. Scorrendo le immagini video o guardando il video al rallentatore, determina quale tra i penny perde prima il contatto con il metro mentre cade. (b) Fai una dimostrazione teorica di quale penny dovrebbe perdere prima il contatto e confrontala con il risultato sperimentale.

## Cambiamenti dei contenuti

**Riorganizzazione del Capitolo 16 (*Moto delle onde*)**. Questa combinazione dei Capitoli 16 e 17 dell'ultima edizione unisce tutto il materiale fondamentale sulle onde meccaniche in viaggio su corde e sulle onde sonore attraverso i materiali in un unico capitolo. Ciò consente di confrontare più da vicino le caratteristiche dei due tipi di onde che sono simili, come le derivazioni della velocità dell'onda. Il paragrafo sulla riflessione e la trasmissione delle onde, di cui non è necessario discuterne i dettagli in un capitolo sulle onde progressive, in questa edizione è stato spostato nel Capitolo 17 (Sovrapposizione e onde stazionarie), in cui si inserisce in modo più naturale in una discussione sugli effetti delle condizioni al contorno sulle onde.

**Riorganizzazione dei Capitoli 22-24.** Lo spostamento del materiale sulla distribuzione continua di carica dal Capitolo 22 (Campi elettrici) al Capitolo 23 (Distribuzioni continue di carica e legge di Gauss) dà luogo a un capitolo che rappresenta un'introduzione più graduale per gli studenti nel nuovo e impegnativo argomento dell'elettricità. Il capitolo riguarda ora solo i campi elettrici dovuti a cariche puntiformi.

Nella precedente edizione, il Capitolo 23 riguardava solo l'analisi dei campi elettrici dovuti a distribuzioni continue di carica utilizzando la legge di Gauss. Lo spostamento del materiale sulla distribuzione continua di carica nel nuovo Capitolo 23 dà luogo a un intero capitolo basato sull'analisi dei campi generati da distribuzioni continue di carica, utilizzando due tecniche: l'integrazione e la legge di Gauss.

In precedenza, il Capitolo 23 conteneva una discussione su quattro proprietà dei conduttori carichi isolati. Tre delle proprietà erano discusse e argomentate dai principi di base, mentre allo studente era stata indicata la necessaria documentazione nel capitolo successivo (sul potenziale elettrico) per una discussione della quarta proprietà. Grazie allo spostamento di questa discussione nel Capitolo 24 lo studente ha a disposizione tutto il materiale di base necessario *prima* della discussione delle proprietà dei conduttori carichi isolati e tutte e quattro le proprietà possono essere discusse insieme a partire dai principi di base.

**Nuovo approccio della narrazione per la Storia introduttiva del capitolo.** Ogni capitolo si apre con una *Storia introduttiva*. Questa caratteristica fornisce una narrazione continua attraverso l'intero libro che riguarda "te" in veste di uno studente curioso di fisica che osserva e analizza fenomeni presenti nella vita quotidiana. La Storia introduttiva di molti capitoli coinvolge misurazioni effettuate con uno smartphone, ricerche di video su YouTube o indagini su Internet.

**Nuovi Collegamenti all'inizio dei capitoli.** L'inizio di ogni capitolo presenta anche una sezione intitolata "Collegamenti" che mostra come gli argomenti nel capitolo si collegano agli argomenti precedentemente studiati e agli argomenti successivi. La sezione Collegamenti fornisce una panoramica dei concetti, spiega perché questo capitolo è posizionato in questa particolare posizione rispetto agli altri capitoli e mostra come la struttura della fisica si basa sugli argomenti precedenti.

## Caratteristiche del testo

La maggior parte degli insegnanti ritiene che il libro di testo scelto per il corso debba costituire la guida principale per comprendere gli argomenti e per studiare la materia. In aggiunta, il libro deve essere di facile accessibilità, nel senso che lo stile e la scrittura devono rendere più semplici sia l'insegnamento che l'apprendimento. Per questo la nuova edizione include molti aspetti didattici nuovi – elencati qui sotto – che hanno lo scopo di accrescere l'utilità di questo testo sia per gli studenti che per gli insegnanti.

## Risoluzione dei problemi e comprensione dei concetti

**Approccio con modelli di analisi alla risoluzione dei problemi.** Gli studenti affrontano centinaia di problemi durante il corso di fisica, le cui basi sono costituite da un piccolo numero 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 le loro applicazioni, 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. 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 dovuta alla gravità, che è costante. Lo studente ha appreso che il modello di analisi *punto materiale sottoposto ad accelerazione costante* descrive questa situazione. Inoltre, questo modello ha un piccolo numero di equazioni associate da usare per dare inizio alla soluzione del problema, 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 ricorrere alla 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. 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.

La strategia generale per la risoluzione dei problemi è delineata nel Capitolo 2 (Paragrafo 2.4, pagine 30-32) e fornisce allo studente un processo strutturato per risolvere i problemi. Questa strategia viene seguita puntualmente in tutti gli esempi che si incontrano nel testo, 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.

I **box descrittivi del Modello di analisi** sono presenti alla fine di ogni paragrafo che introduce un nuovo Modello di analisi. Questa caratteristica riassume il Modello di Analisi introdotto nel paragrafo e fornisce esempi dei tipi di problemi che uno studente potrebbe risolvere utilizzando il Modello di analisi. Questi box fungono da "rinfrescata" prima che lo studente veda i modelli di analisi in uso negli esempi svolti relativi a un dato paragrafo. L'approccio è ulteriormente rafforzato nel sommario di fine capitolo con il titolo *Modelli di analisi per la risoluzione dei problemi*.

**Esempi svolti.** Tutti gli esempi svolti sono presentati in un formato a due colonne che permette di dare maggior risalto ai concetti fisici. La colonna di sinistra mostra le informazioni testuali e i passi da seguire per arrivare alla soluzione. La colonna di destra contiene le manipolazioni matematiche e i risultati relativi ai vari passi. Questo tipo di stesura, che visualizza con chiarezza l'accoppiamento fra il concetto fisico e la sua esecuzione matematica, aiuta gli studenti ad organizzare il lavoro. Questi esempi ricalcano il Modello di analisi per la risoluzione dei problemi introdotto nel Capi-

tolo 2, che ha lo scopo di rendere più solido ed efficace l'atteggiamento da assumere nell'affrontare i problemi. Tutti gli esempi con svolgimento possono essere assegnati come compiti a casa. Un campione di esempio completamente risolto è quello mostrato nella pagina seguente. Questi esempi sono di due tipi. Gli esempi del primo tipo presentano un problema ed una risposta numerica. Gli esempi del secondo tipo sono invece di natura concettuale. Per dare maggiore enfasi alla comprensione dei concetti di fisica, i molti esempi concettuali sono segnalati come tali, presentati entro un riquadro e progettati per spingere lo studente a mettere a fuoco il particolare aspetto fisico del problema. Le risoluzioni degli esempi svolti nel testo adesso integrano più estesamente l'approccio con modelli di analisi alla soluzione dei problemi. Sulla base delle osservazioni dei revisori dell'edizione precedente, è stata effettuata un'attenta revisione degli esempi svolti, cosicché le risoluzioni sono presentate in maniera simbolica il più possibile, sostituendo i valori numerici solo alla fine. Questo approccio aiuterà gli studenti a pensare simbolicamente quando risolvono i problemi anziché inserire numeri non necessari nelle equazioni intermedie.

**E se?** Circa un terzo degli esempi di questo testo contiene la domanda *E se?* Posta alla fine della soluzione, questa domanda presenta una variante della situazione precedentemente esposta. Il quesito *E se?* ha lo scopo di incoraggiare gli studenti a meditare sui risultati ottenuti e ad approfondire il contenuto concettuale di quell'esempio. Serve anche ad affrontare nuovi problemi, che magari possono ripresentarsi negli esami. Si noti che il quesito *E se?* appare anche in qualche problema di fine capitolo.

**Quiz.** I quiz sono una opportunità per verificare quanto è stato compreso del concetto fisico appena incontrato. Per rispondere ai quiz gli studenti devono decidere in base a ragionamenti sensati; molti dei quiz sono stati studiati per aiutare gli studenti ad evitare fraintendimenti molto comuni. La forma scelta per i quiz è quella chiusa, mirata ad un caso oggettivo specifico, ed include la scelta multipla, il vero-falso e la creazione di classifiche. Le risposte ai quiz si trovano alla fine del libro. Di seguito è riportato un esempio di quiz.

- QUIZ 7.5** Una freccetta è spinta nella canna di un fucile giocattolo comprendendo la molla di un tratto  $x$ . Una seconda freccetta viene inserita comprendendo la molla di  $2x$ . Quanto più velocemente esce dal fucile la freccetta nel secondo caso rispetto al primo? (a) Quattro volte più velocemente; (b) due volte più velocemente; (c) la velocità è uguale; (d) la velocità è un mezzo; (e) la velocità è un quarto.

**Prevenire l'errore.** Il testo mette a disposizione più di duecento *Prevenire l'errore* (come quello a lato), che hanno lo scopo di mettere in guardia contro errori e fraintendimenti diffusi. Appaiono in margine al testo e riguardano i fraintendimenti più comuni e 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 discussi nel capitolo. Il sommario è diviso in tre parti: Definizioni, Concetti e principi, Modelli di analisi per la risoluzione dei problemi. In ogni capitolo opportune caselle inquadrano e mettono in risalto le definizioni, i concetti, i principi o i modelli di analisi.

**Gruppi di Quesiti e Problemi.** Per la nuova edizione, gli Autori hanno revisionato ogni domanda e ogni problema e vi hanno inserito le revisioni volte a migliorarne la leggibilità e l'applicabilità.

#### PREVENIRE L'ERRORE 16.2

**Due diverse velocità** Non si confonda  $v$ , la velocità di propagazione dell'onda lungo la corda, con la velocità  $v_y$ , la componente trasversale della velocità di un elemento della corda. La velocità  $v$  in un mezzo uniforme è costante sebbene  $v_y$  vari sinusoidalmente.

### Esempio 3.2 Una gita in vacanza

Un'automobile (Figura 3.11a) percorre 20.0 km in direzione Nord e poi 35.0 km a 60.0° dal Nord nel quadrante Nord - Ovest. Si trovi il modulo e la direzione orientata dello spostamento risultante dell'automobile.

#### SOLUZIONE

**Concettualizzare** I vettori  $\vec{A}$  e  $\vec{B}$  del disegno in Figura 3.11a ci aiutano a concettualizzare il problema. Anche il vettore risultante  $\vec{R}$  è stato disegnato. Ci aspettiamo un modulo di qualche decina di chilometri. Ci si aspetta che l'angolo  $\beta$  che il vettore risultante forma con l'asse y sia minore di 60.0°, l'angolo che il vettore  $\vec{B}$  forma con l'asse y.

**Classificare** Questo problema appartiene alla categoria dei problemi di somma di vettori. Lo spostamento  $\vec{R}$  è il risultante che si ottiene sommando i due spostamenti  $\vec{A}$  e  $\vec{B}$ . Possiamo ancora classificare il problema come un problema di analisi di triangoli e dobbiamo utilizzare le nostre conoscenze di geometria e di trigonometria.

**Analizzare** In questo esempio vengono illustrati due metodi per calcolare il risultante di due vettori. Il problema può essere risolto geometricamente usando carta millimetrata, goniometro e righello per ricavare il modulo e la direzione orientata, come mostrato in Figura 3.11a. (Infatti anche quando si deve seguire un calcolo conoscendo cosa fare, si dovrebbero sempre disegnare i vettori se non altro per verificare il risultato). Con un righello e un goniometro è difficile ottenere una precisione migliore di due cifre significative, invece di tre, anche facendo uso di un diagramma molto ingrandito. Si provi a usare questi strumenti per  $\vec{R}$  e si faccia il confronto con il risultato del calcolo trigonometrico che segue!

Il secondo metodo è risolvere il problema utilizzando l'algebra e la trigonometria. Il modulo di  $\vec{R}$  può essere ottenuto usando la legge dei coseni applicata al triangolo in Figura 3.11a (Appendice B.4).

Si usa  $R^2 = A^2 + B^2 - 2AB \cos \theta$  dalla legge dei coseni per trovare  $R$ :

$$R = \sqrt{A^2 + B^2 - 2AB \cos \theta}$$

Si sostituiscono i valori numerici tenendo conto che  $\theta = 180^\circ - 60^\circ = 120^\circ$ :

$$R = \sqrt{(20.0 \text{ km})^2 + (35.0 \text{ km})^2 - 2(20.0 \text{ km})(35.0 \text{ km}) \cos 120^\circ}$$

$$= 48.2 \text{ km}$$

Si usa la legge dei seni (Appendice B.4) per trovare la direzione orientata di  $\vec{R}$  misurata rispetto alla direzione Nord:

$$\frac{\sin \beta}{B} = \frac{\sin \theta}{R}$$

$$\sin \beta = \frac{B}{R} \sin \theta = \frac{35.0 \text{ km}}{48.2 \text{ km}} \sin 120^\circ = 0.629$$

$$\beta = 38.9^\circ$$

Lo spostamento risultante dell'auto è quindi 48.2 km a 38.9° a Ovest rispetto al Nord.

**Concludere** L'angolo  $\beta$  appena calcolato è compatibile con quanto si può stimare osservando la Figura 3.11a o con l'angolo effettivamente misurato con il metodo grafico? È ragionevole che il modulo di  $\vec{R}$  sia maggiore dei moduli di  $\vec{A}$  e di  $\vec{B}$ ? Le unità di misura di  $\vec{R}$  sono quelle giuste?

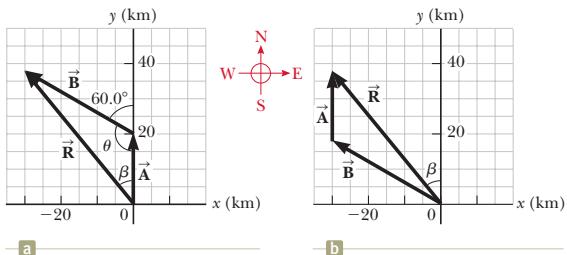
Il metodo grafico, che pure funziona molto bene, soffre di due inconvenienti. Per prima cosa molti trovano pesante

l'uso delle leggi del seno e del coseno. Inoltre solo nella somma di due vettori si ottiene un triangolo. Con tre o più vettori la costruzione geometrica non è più un triangolo. Un metodo nuovo, privo di questi inconvenienti, verrà illustrato nel Paragrafo 3.4.

**E S E ?** Nell'ipotesi che nella gita i due spostamenti fossero stati scambiati e cioè che il primo fosse stato di 35.0 km a 60.0° dal Nord verso Ovest e il secondo 20.0 km verso Nord, cosa sarebbe cambiato nel risultato?

**Risposta** Non sarebbe cambiato nulla. La legge di somma di vettori è commutativa per cui l'ordine dei vettori è irrilevante. La Figura 3.11b mostra graficamente che lo scambio dei vettori produce lo stesso vettore risultante.

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 della situazione, determinare cosa accade quando una grandezza viene assunta a un certo valore limite o chiedere se possano essere determinate informazioni aggiuntive relative alla situazione del problema. Questo elemento incoraggia gli studenti a riflettere sui risultati dell'esempio e assiste nella comprensione concettuale dei principi.



**Figura 3.11** (Esempio 3.2) (a) Metodo grafico per trovare lo spostamento risultante  $\vec{R} = \vec{A} + \vec{B}$ . (b) Se i vettori vengono sommati in ordine invertito ( $\vec{B} + \vec{A}$ ) il risultante è ancora  $\vec{R}$ .

**Problemi.** Ogni capitolo termina con la proposta di un numero molto esteso di problemi. Complessivamente il testo contiene più di 2 000 problemi. Le soluzioni dei problemi con numero dispari si trova alla fine del libro. I problemi di fine capitolo sono organizzati in sezioni in ciascun capitolo (circa due terzi dei problemi sono assegnati a specifici paragrafi). All'interno di ciascuna sezione, i problemi adesso conducono gli studenti a riflessioni di livello crescente, attraverso la presentazione di tutti i problemi più semplici nella prima parte, seguiti da quelli di livello intermedio. (La numerazione è in **nero** per i problemi più semplici e in **blu** per i problemi di livello intermedio.) La sezione *Altri problemi* contiene i problemi non assegnati ad alcun paragrafo specifico. Al termine di ogni capitolo è presente la sezione *Problemi impegnativi*, che raccoglie i problemi più difficili di ciascun capitolo. (I problemi impegnativi sono numerati in **rosso**.)

Nel testo sono presenti vari tipi di problemi.

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

Il problema è identificato mediante l'icona **Q|C**.

- 35.** Una molla disposta orizzontalmente con un'estremità fissa alla parete ha una costante elastica  $k = 850 \text{ N/m}$ . Un blocco di massa  $m = 1.00 \text{ kg}$  è attaccato alla molla alla sua estremità libera ed è appoggiato su un piano di attrito trascurabile come mostrato in Figura P8.35. (a) Il blocco viene spostato nella posizione  $x_i = 6.00 \text{ cm}$  rispetto all'equilibrio e lasciato andare. Si trovi l'energia potenziale elastica della molla quando il blocco si trova in  $x_i = 6.00 \text{ cm}$  e quando passa per la posizione di equilibrio. (b) Si trovi la velocità del blocco al suo passaggio per la posizione di equilibrio. (c) Qual è la velocità del blocco quando questo passa per la posizione  $x_i/2 = 3.00 \text{ cm}$ ? (d) Perché la risposta al punto (c) non è la metà di quella del punto (b)?

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

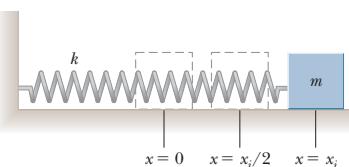


Figura P8.35

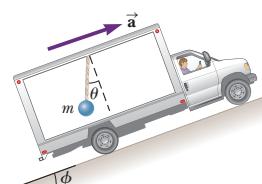
La parte (d) pone un quesito concettuale relativo alla situazione descritta.

**S** I *problemi simbolici* chiedono agli studenti di risolvere un problema utilizzando la sola manipolazione simbolica. I revisori dell'edizione precedente (come pure la maggior parte degli intervistati in un ampio sondaggio) hanno 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 ragionino i loro studenti quando risolvono i problemi di fisica. Un esempio di problema simbolico è riportato qui di seguito.

Il problema è identificato mediante l'icona **S**.

- 36.** Un camioncino si sta muovendo con accelerazione costante  $a$  su di un pendio che forma un angolo  $\phi$  con l'orizzontale, come mostrato in Figura P6.36, e una piccola sferetta di massa  $m$  è appesa al soffitto del camioncino tramite una corda di massa trascurabile. Se il filo forma un angolo costante  $\theta$  con la retta perpendicolare al soffitto, quanto vale  $a$ ?

Nel testo del problema non compaiono numeri.



La figura mostra solo grandezze simboliche.

Figura P6.36

La risposta del problema è meramente simbolica.

$$36. g(\cos \phi \tan \theta - \sin \phi)$$

**PG** I *problem 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 sono richiesti l'uso di vari concetti e l'esecuzione di un certo numero di calcoli. Molti studenti non sono abituati a un tale livello di complessità e di sovente 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) aiutano gli studenti ad allenarsi a scomporre i problemi complessi in una serie di problemi più semplici, un'abilità di problem-solving essenziale. Un esempio di problema guidato è riportato qui di seguito.

- PG** 24. Una trave omogenea di lunghezza  $L = 6.00\text{ m}$  e massa  $M = 90.0\text{ kg}$  è appoggiata su due sostegni come mostrato in Figura P12.24. Il sostegno sinistro esercita sulla trave una forza normale  $n_1$  mentre il sostegno destro, posto a distanza  $\ell = 4.00\text{ m}$  dal primo, esercita una forza normale  $n_2$ . Una donna di massa  $m = 55.0\text{ kg}$  cammina sulla trave partendo dall'estremo sinistro e procedendo verso il destro. Si vuole determinare la posizione della donna che fa sì che la trave cominci ad inclinarsi. (a) Qual è il modello di analisi appropriato per la trave prima che inizi ad inclinarsi? (b) Si disegni il diagramma delle forze per la trave, indicando la forza gravitazionale e le forze normali agenti sulla trave quando la donna si trova ad una distanza  $x$  dall'estremo sinistro. (c) Dove si trova la donna quando la forza  $n_1$  è massima? (d) Quanto vale  $n_1$  quando la trave è sul punto di inclinarsi? (e) Si usi l'Equazione 12.1 per calcolare il valore di  $n_2$  quando la trave è sul punto di inclinarsi. (f) Usando il risultato ottenuto nella domanda (d) e l'Equazione 12.2, applicata calcolando i momenti rispetto ad un'asse passante per il sostegno di destra, si determini la posizione della donna in corrispondenza della quale la trave inizia ad inclinarsi. (g) Si risolva nuovamente il punto (e) calcolando i momenti rispetto ad un asse passante per il sostegno sinistro.

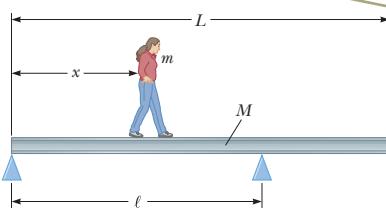


Figura P12.24

Il problema è identificato mediante l'icona PG.

Viene identificato l'obiettivo del problema.

L'analisi inizia con l'identificazione dell'appropriato modello di analisi.

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

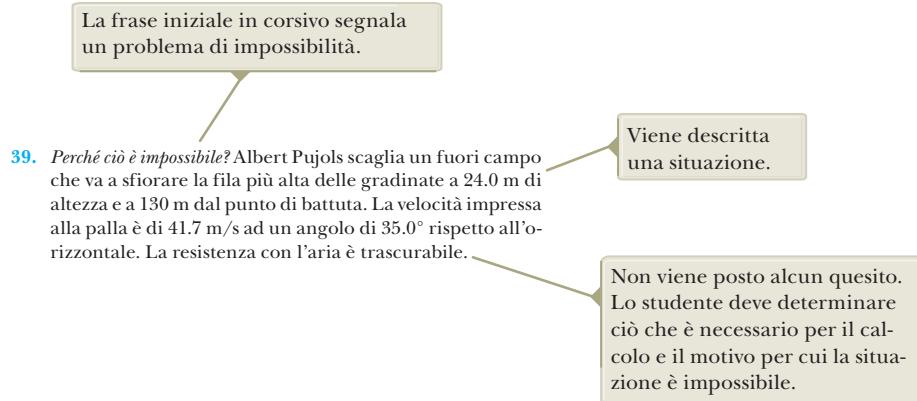
Viene richiesto il calcolo associato all'obiettivo.

**BIO** *Problemi biomedici.* Questi problemi sottolineano la rilevanza dei problemi di fisica per gli studenti dei corsi di laurea in scienze della vita.

*Problemi di impossibilità.* La ricerca sull'insegnamento della fisica si è concentrata molto sulle abilità di problem-solving 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 ogni capitolo, in media, sono strutturati come problemi di impossibilità. Questi sono introdotti con la frase *Perché ciò è impossibile?*, seguita dalla descrizione di una situazione. L'aspetto che colpisce 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 infor-

mazioni derivanti da esperienze personali, senso comune, ricerche su Internet o in letteratura, misurazioni, strumenti matematici, conoscenza di norme umane 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 qui di seguito.



*Problemi accoppiati.* Si tratta di problemi identici, ma uno richiede una soluzione numerica e l'altro una derivazione simbolica. In questa edizione è presente una coppia di tali problemi nella maggior parte dei capitoli, indicata con un rettangolo color ciano.

*Problemi di riepilogo.* 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 riepilogo**) sono lì per mostrare il carattere integrato del testo e come la fisica sia una costruzione coerente di idee. Di fronte ad argomenti del mondo reale, come il riscaldamento globale o la proliferazione delle armi nucleari, bisogna 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.

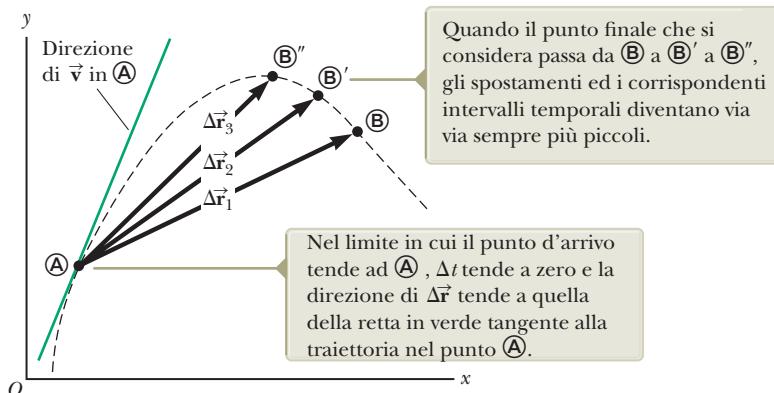
*Problemi di progettazione.* In parecchi capitoli appaiono dei problemi in cui lo studente deve determinare i parametri di un progetto perché il prodotto finale possa funzionare correttamente.

*Problemi basati sul calcolo differenziale.* Ogni capitolo contiene almeno un problema per cui sono essenziali le idee e i metodi propri del calcolo differenziale.

*Iconografia.* Ogni elemento iconografico in questa edizione è presentato in uno stile moderno che aiuta a esprimere i principi della fisica in azione in modo chiaro e preciso. 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 tipo di formato aiuta gli studenti che hanno un tipo di apprendimento più visivo. Un esempio di figura con fumetti esplicativi è riportato nella pagina successiva.

*Appendice di matematica.* L'appendice di matematica (Appendice B), uno strumento di grande aiuto per lo studente, mostra gli strumenti matematici in un contesto fisico. Questa è una risorsa ideale per quegli studenti che hanno biso-

gno di un ripasso immediato e conciso di argomenti di algebra, trigonometria e calcolo differenziale.



**Figura 4.2** Quando un punto materiale si sposta da un punto ad un altro, la sua velocità media ha la direzione del vettore spostamento  $\Delta\vec{r}$ . Per definizione, la velocità istantanea ha la direzione della retta tangente alla curva in  $\textcircled{A}$ .

## Aspetti coadiuvanti

**Stile.** È stato scelto uno stile chiaro, logico ed attraente nel tentativo di rendere più facile ed immediata la comprensione del testo. Per rendere gradevole la lettura, lo stile della scrittura è abbastanza informale e rilassato. Ogni termine nuovo è definito con cura e non sono utilizzate espressioni gergali.

**Definizioni ed equazioni importanti.** Le definizioni più importanti appaiono in **grassetto** o evidenziate con un **retino**, il che dà loro maggior risalto e rende facile ritrovarle. Anche le equazioni più importanti sono evidenziate con un retino per localizzarle facilmente.

**Note a margine.** L'icona ▶ segnala una nota o un commento a margine del testo, che serve per individuare un concetto, un enunciato o un'equazione particolarmente significativi.

**Uso pedagogico del colore.** Prima della lettura si dovrebbe consultare la **carta dei colori** che appare nella seconda di copertina. La carta contiene tutti i simboli colorati che vengono impiegati nei diagrammi del testo e che costituiscono un vero e proprio sistema coerente.

**Livello matematico.** Il calcolo differenziale viene introdotto con gradualità per tener conto del fatto che, molto spesso, gli studenti seguono il corso di fisica contemporaneamente ad un corso di matematica di base. Quando si introducono equazioni fondamentali, si mostrano anche i passi necessari per ottenerle e si rimanda anche alle appendici matematiche che sono disponibili alla fine del libro. Benché i vettori siano trattati in dettaglio nel Capitolo 3, il prodotto tra vettori viene introdotto solo nel momento in cui viene richiesto dalle situazioni fisiche esposte più avanti nel testo. Il prodotto scalare viene introdotto nel Capitolo 7, dove si parla di energia dei sistemi, mentre il prodotto vettoriale deve attendere il Capitolo 11, che è dedicato alla quantità di moto.

**Cifre significative.** Sia negli esempi svolti contenuti nel testo che nei problemi di fine capitolo una cura particolare è stata dedicata al trattamento delle cifre significative. La maggior parte degli esempi viene svolta con due o tre cifre significative, a seconda della precisione dei dati forniti. Di regola 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, pp. 13-15.)

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

**Appendici e risvolti di copertina.** Alla fine del libro è presente tutta una serie di appendici. Molte di esse sono una rassegna dei concetti e delle tecniche di matematica che vengono impiegati nel testo (ed a cui il testo rimanda), come la notazione scientifica, l'algebra, la geometria, la trigonometria, il calcolo differenziale ed integrale. La maggior parte di queste rassegne matematiche contiene esempi con svolgimento 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, di facile accesso, contengono informazioni utili: costanti fondamentali, dati di fisica, dati del sistema planetario, una lista dei prefissi standard, simboli matematici, l'alfabeto greco e le abbreviazioni standard delle unità di misura.

## Opzioni per gli insegnanti

Gli argomenti di questo libro sono presentati nell'ordine seguente: la meccanica classica, la meccanica delle onde, il calore e la termodinamica e poi l'elettricità e il magnetismo, le onde elettromagnetiche, l'ottica, la relatività. La sequenza è quella tradizionale, con la trattazione delle onde meccaniche che precede l'elettricità ed il magnetismo. Alcuni docenti potrebbero preferire trattare insieme le onde meccaniche e le onde elettromagnetiche dopo aver completato lo studio dell'elettricità e del magnetismo. In questo caso i Capitoli 16 e 17 devono accompagnare il Capitolo 33. Il capitolo sulla relatività si trova alla fine del libro, visto che questo argomento viene spesso considerato come una introduzione alla "fisica moderna". Se il tempo lo permette, il docente può scegliere di anticipare il Capitolo 38 e discuterlo subito dopo aver completato il Capitolo 13, a conclusione del materiale che riguarda la meccanica newtoniana. I docenti che debbano impartire il loro insegnamento in due semestri possono tagliare alcuni dei paragrafi e dei capitoli del Volume II senza perdite di continuità. I paragrafi che, in tal senso, possono essere considerati opzionali sono i seguenti:

---

<b>25.7</b>	Una descrizione atomica dei dielettrici	<b>30.6</b>	Correnti parassite
<b>26.5</b>	Superconduttori	<b>33.6</b>	Produzione di onde elettromagnetiche da un'antenna
<b>27.5</b>	Impianti elettrici e sicurezza elettrica nelle abitazioni	<b>35.5</b>	Aberrazioni delle lenti
<b>28.3</b>	Particelle caricate in moto in un campo magnetico: applicazioni	<b>35.6</b>	Strumenti ottici
<b>28.6</b>	Effetto Hall	<b>37.5</b>	Difrazione di raggi X da cristalli
<b>29.6</b>	Magnetismo nella materia	<b>38.9</b>	Teoria della relatività generale

---

# Per gli studenti

**E** giusto dare qualche suggerimento a vantaggio del lettore-studente. Si presume che questi abbia già letto la prefazione, che contiene la descrizione delle 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 che sono basati sulla nostra esperienza personale, 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 che studiano la natura. Gli altri corsi scientifici che seguiranno faranno uso dei principi della fisica ed è quindi importante che lo studente capisca e sia capace di applicare i vari concetti e le teorie discussi nel libro.

## Concetti e principi

È essenziale che lo studente abbia capito bene i concetti e i principi di base prima di tentare di risolvere i problemi assegnati. Per questo è importante che lo studente legga in anticipo quella parte del testo che riguarda gli argomenti della lezione che dovrà seguire. Nel leggere il testo, lo studente dovrebbe annotare quei punti che non gli sono chiari. È necessario fare ogni sforzo per cercare di rispondere alle domande dei Quiz nel momento in cui si presentano. Abbiamo fatto ogni sforzo per preparare delle domande che possano aiutare lo studente a verificare da solo la qualità del suo apprendimento. Si studino 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 l'errore* saranno di supporto nell'evitare di cadere in congetture errate comuni in fisica. In aula, si prendano appunti e si facciano domande sugli argomenti che sono 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. La lezione e il lavoro aggiuntivo in laboratorio sono complementari alla rilettura del testo e devono servire a chiarire gli argomenti più difficili. Si deve riuscire a rendere minima la quantità di materiale da ricordare. Una memorizzazione di frasi del testo, di equazioni e dimostrazioni non indica necessariamente la comprensione degli argomenti. La comprensione del materiale didattico aumenterà sicuramente se, ad uno studio efficace, si combineranno le discussioni con compagni di studio e docenti e la capacità di risolvere i problemi presentati nel testo. Si facciano domande ognqualvolta se ne sente 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*, si è letto il corrispondente materiale del testo. Come regola generale, si devono 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 compagni che frequentano il corso. Sono utili, spesso, i consigli degli studenti più anziani. Molto spesso, il docente offre 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

Si deve cercare di utilizzare la varie peculiarità del testo che sono state discusse nella prefazione. Per esempio, le note a margine sono utili per localizzare 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 trova posto nel testo, là dove viene più spesso utilizzata. L'Appendice B è un utile riassunto delle tecniche matematiche.

Le risposte ai Quiz e ai problemi con numero dispari sono riportate alla fine del libro. L'Indice dei contenuti fornisce una visione concisa dell'intero testo, mentre l'Indice analitico assicura una facile localizzazione degli argomenti. Le note a piè di pagina spesso sono 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 che sono stati utilizzati per giungere a certe relazioni chiave. In alcuni casi, per localizzare certi argomenti, può essere necessario consultare l'indice analitico del libro. Si deve essere capaci di associare alle singole grandezze i simboli usati per rappresentarle e le loro unità di misura. Inoltre, si deve 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 i problemi. L'abilità nel risolvere i problemi è la migliore verifica del grado di apprendimento della fisica e quindi è necessario cercare di risolvere il maggior numero possibile di problemi. È essenziale che si comprendano bene i concetti e i principi di base prima di provare a risolvere i problemi. È buona pratica cercare di risolvere lo stesso problema in vari modi. 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 si deve pensare che si è 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 in 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, forse, suggerisce qualche ipotesi da fare. L'abilità di capire correttamente le domande è parte integrante della strategia di risoluzione. Si deve poi 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 (*Concettualizzare, Classificare, Analizzare, Concludere*), lo studente non solo troverà più facile arrivare ad una soluzione, ma dagli sforzi fatti riceverà maggiori vantaggi. Tale strategia, presentata nel Paragrafo 2.4, 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, che sono indicate con un titolo blu e seguono comunque il profilo della Strategia generale per la risoluzione 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 analitici per la risoluzione dei problemi* presenti nei sommari dei capitoli, in modo da riuscire a capire come ciascun modello possa essere applicato ad una specifica situazione. Solo nella versione ebook sono forniti in lingua originale sotto forma di appendice gli svolgimenti dei problemi con numero pari e dei problemi impegnativi.

## Esperimenti

La fisica è una scienza che si basa sulle osservazioni sperimentali. Per questa ragione, noi raccomandiamo allo studente di non limitarsi alla lettura del testo, ma di compiere degli esperimenti con le proprie mani, 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



dove  $k$  è la costante elastica della molla,  $m$  il valore della massa e la carica  $q$  nell'Equazione 31.20 ha matematicamente lo stesso ruolo della  $x$  nell'equazione  $\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{k}{m}x$ . La soluzione dell'equazione ha l'espressione generale:

$$x = A \cos(\omega t + \phi)$$

dove  $\omega$  è la pulsazione del moto armonico descritta dall'Equazione  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ ,

$A$  l'ampiezza del moto (massimo valore di  $x$ ) e  $\phi$  la costante di fase; i valori di  $A$  e  $\phi$  dipendono dalle condizioni iniziali. Poiché l'Equazione 31.20 ha la stessa forma dell'equazione differenziale dell'oscillatore armonico, la sua soluzione è

$$q = Q_{\max} \cos(\omega t + \phi) \quad (31.21)$$

dove  $Q_{\max}$  è il valore massimo della carica del condensatore e la pulsazione  $\omega$  è la radice quadrata del coefficiente  $q$  nell'Equazione 31.20:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (31.22)$$

La carica nel condensatore inverte la sua polarità alternativamente, come un oscillatore armonico semplice. Si noti che la pulsazione delle oscillazioni dipende solamente dall'induttanza e dalla capacità del circuito. L'Equazione 31.22 permette di calcolare la *frequenza propria* delle oscillazioni in un circuito *LC*.

Poiché  $q$  varia sinusoidalmente, anche la corrente nel circuito varia secondo una legge simile. Lo si può dimostrare facilmente derivando l'Equazione 31.21 rispetto al tempo:

$$i = \frac{dq}{dt} = -\omega Q_{\max} \sin(\omega t + \phi) = -I_{\max} \sin(\omega t + \phi) \quad (31.23)$$

Una descrizione grafica del trasferimento di energia tra induttore e condensatore in un circuito *LC* è mostrata nella Figura 31.12. Come abbiamo detto, il comportamento del circuito è analogo a quello del punto materiale in moto armonico semplice studiato nel Volume I. Si consideri il sistema blocco-molla le cui oscillazioni sono mostrate a destra nella Figura 31.12. L'energia potenziale elastica  $\frac{1}{2}kx^2$  immagazzinata nella molla è analoga all'energia potenziale elettrostatica  $q^2/2C$  immagazzinata nel condensatore in Figura 31.12. L'energia cinetica  $\frac{1}{2}mv^2$  della massa in movimento è analoga all'energia magnetica  $\frac{1}{2}L^2$  immagazzinata nell'induttore, che richiede la presenza di cariche in moto. Nella Figura 31.12a, nell'istante  $t = 0$  (quando  $i = 0$ ) tutta l'energia è immagazzinata come energia potenziale elettrostatica nel condensatore; analogamente, tutta l'energia è energia potenziale del sistema blocco-molla quando, nell'istante  $t = 0$ , la molla allungata viene rilasciata. Nella Figura 31.12b, quando la corrente ha valore massimo  $I_{\max}$ , tutta l'energia è immagazzinata come energia magnetica  $\frac{1}{2}L^2_{\max}$  nell'induttore, dove  $I_{\max}$  è la corrente massima del circuito. Le Figure 31.12c e 31.12d mostrano le analogie nei successivi quarti di ciclo, in cui l'energia è tutta elettrostatica o tutta magnetica. Per punti intermedi, l'energia è in parte elettrostatica e in parte magnetica (Fig. 31.12e).

I grafici di  $q$  e  $i$  in funzione di  $t$  sono mostrati nella Figura 31.13. La carica del condensatore oscilla tra i valori estremi  $Q_{\max}$  e  $-Q_{\max}$  e la corrente oscilla tra  $I_{\max}$  e  $-I_{\max}$ . Inoltre, tra carica e corrente c'è una differenza di fase di  $90^\circ$ : quando la carica raggiunge il suo valore massimo, la corrente è zero, e viceversa.

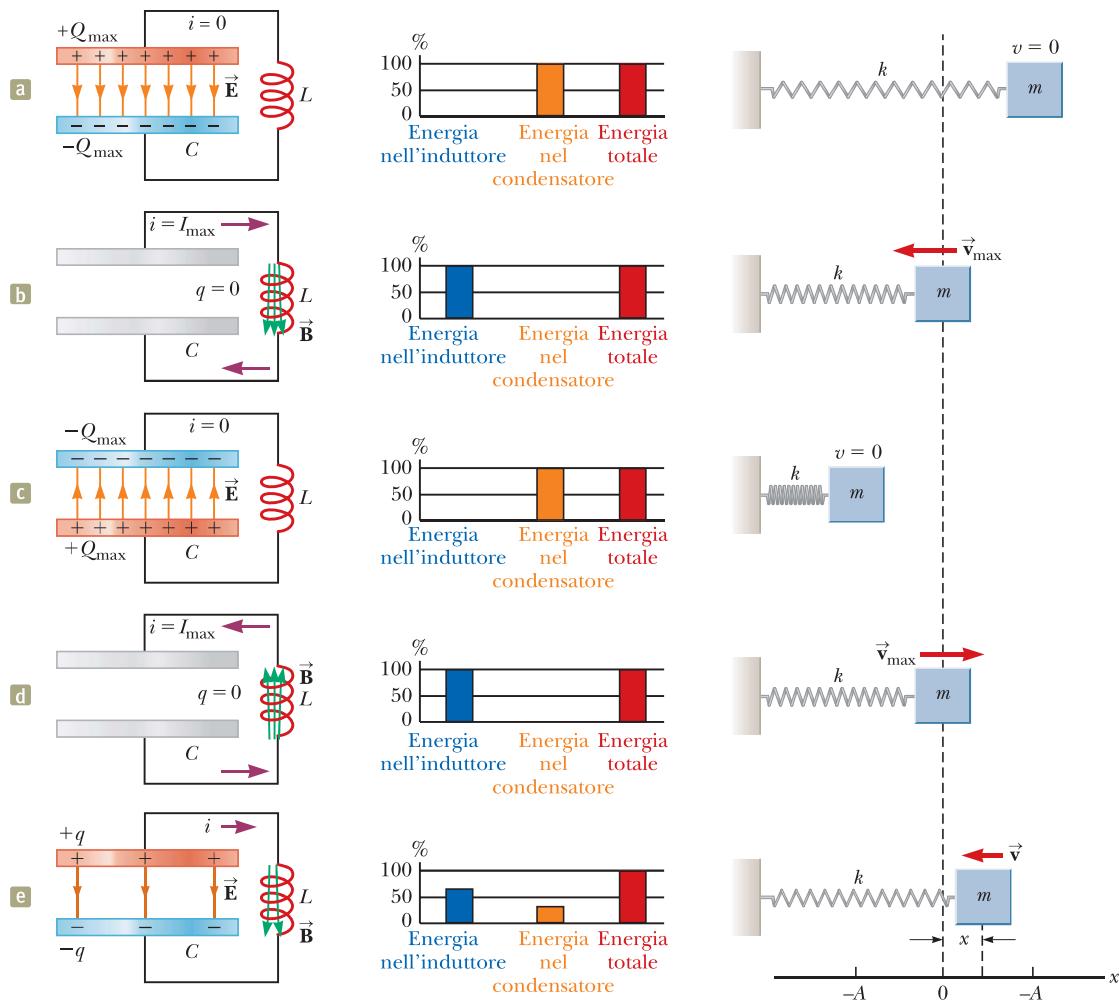
La Figura 31.14 mostra gli andamenti di  $U_E$  e di  $U_B$  in funzione del tempo. La somma  $U_E + U_B$  è costante ed è uguale all'energia totale  $Q_{\max}^2/2C$  oppure  $\frac{1}{2}LI_{\max}^2$ . Una prova analitica di questo fatto è immediata. Le ampiezze dei due grafici della Figura 31.14 devono essere uguali, infatti l'energia massima immagazzinata nel condensatore (quando  $i = 0$ ) deve essere uguale all'energia massima immagazzinata nell'induttore (quando  $q = 0$ ). Matematicamente tale uguaglianza è espressa da

$$\frac{Q_{\max}^2}{2C} = \frac{LI_{\max}^2}{2}$$

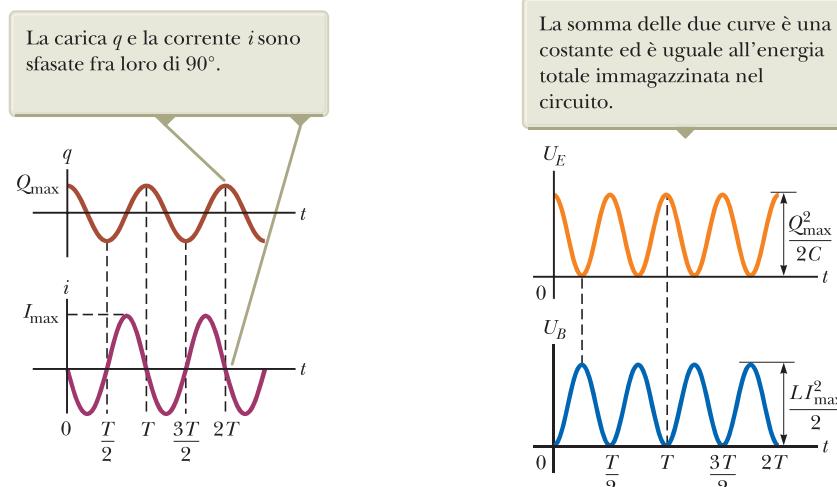
◀ Carica in funzione del tempo per un circuito *LC* ideale

◀ Pulsazione delle oscillazioni in un circuito *LC* ideale

◀ Corrente in funzione del tempo per un circuito *LC* ideale



**Figura 31.12** Trasferimento di energia in un circuito  $LC$  di resistenza nulla che non irraggia. Il condensatore ha inizialmente una carica  $Q_{\max}$  e all'istante  $t = 0$  l'interruttore della Figura 31.11 viene chiuso in posizione *b*. L'analogo meccanico del circuito è il punto materiale in moto armonico semplice rappresentato da un sistema blocco-molla nella figura di destra. (a)-(d) In questi istanti tutta l'energia è in un solo elemento del circuito. (e) Negli altri istanti l'energia si ripartisce tra il condensatore e l'induttore.



**Figura 31.13** Grafici della carica e della corrente in funzione del tempo in un circuito  $LC$  di resistenza nulla che non irraggia.

**Figura 31.14** Grafici di  $U_E$  e  $U_B$  in funzione del tempo per un circuito  $LC$  di resistenza nulla che non irraggia.

Nella nostra schematizzazione ideale le oscillazioni persistono indefinitamente nel circuito, però l'energia totale  $U$  rimane costante solo se i trasferimenti e le trasformazioni di energia vengono trascurati. Nei circuiti reali c'è sempre una certa resistenza, per cui c'è sempre una trasformazione di energia in energia interna. Come abbiamo evidenziato all'inizio di questo paragrafo, anche l'irraggiamento è stato trascurato. In realtà, in questo tipo di circuito c'è sempre un'emissione di radiazione elettromagnetica, che inevitabilmente provoca la diminuzione dell'energia totale del circuito.

- QUIZ 31.5** (i) In un certo istante, durante le oscillazioni in un circuito  $LC$ , la corrente raggiunge il suo valore massimo. Nello stesso istante, com'è la tensione ai capi del condensatore? (a) È diversa da quella che si osserva ai capi dell'induttore. (b) È nulla. (c) Ha raggiunto il suo valore massimo. (d) Non si può determinare. (ii) Si consideri l'istante in cui la corrente è zero. Utilizzando le stesse risposte, si descriva la tensione ai capi del condensatore in tale istante.

### Esempio 31.6 Oscillazioni in un circuito $LC$

Nella Figura 31.11 la batteria ha una f.e.m. di 12.0 V, l'induttanza è 2.81 mH e la capacità è 9.00 pF. L'interruttore si trova da molto tempo in posizione *a* ed il condensatore è carico. L'interruttore viene poi commutato in *b*; con questa operazione si rimuove la batteria dal circuito e si connette il condensatore ai capi dell'induttore.

(A) Si calcoli la frequenza d'oscillazione del circuito.

#### SOLUZIONE

**Concettualizzare** Quando l'interruttore viene commutato in *b*, la parte attiva del circuito è la maglia di destra, che è un circuito  $LC$ .

**Classificare** Si usano le equazioni sviluppate in questo paragrafo, per cui questo esempio è un problema di sostituzione.

Si usa l'Equazione 31.22 per trovare la frequenza:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Si sostituiscono i valori numerici:

$$f = \frac{1}{2\pi[(2.81 \times 10^{-3} \text{ H})(9.00 \times 10^{-12} \text{ F})]^{1/2}} = 1.00 \times 10^6 \text{ Hz}$$

(B) Quali sono i valori massimi della carica sul condensatore e della corrente nel circuito?

#### SOLUZIONE

Si calcola la carica iniziale sul condensatore, che è proprio quella massima:

$$Q_{\max} = C\Delta V = (9.00 \times 10^{-12} \text{ F})(12.0 \text{ V}) = 1.08 \times 10^{-10} \text{ C}$$

Si usa l'Equazione 31.23 per trovare il valore massimo della corrente da quello massimo della carica:

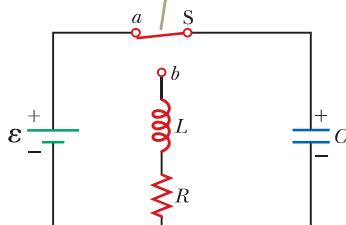
$$\begin{aligned} I_{\max} &= \omega Q_{\max} = 2\pi f Q_{\max} = (2\pi \times 10^6 \text{ s}^{-1})(1.08 \times 10^{-10} \text{ C}) \\ &= 6.79 \times 10^{-4} \text{ A} \end{aligned}$$

## 31.6 Circuito $RLC$

Il circuito  $LC$  introdotto nel paragrafo precedente è ideale, poiché abbiamo considerato nulla la resistenza del circuito. Rivolgeremo ora la nostra attenzione al circuito più realistico di Figura 31.15a, che consiste in un induttore, un condensatore e un resistore connessi in serie. Si assume che la resistenza del resistore rappresenti tutta la resistenza del circuito, che l'interruttore sia in posizione *a* e che il condensatore abbia carica iniziale  $Q_{\max}$ . Spostiamo ora l'interruttore in posizione *b*, come mostrato in Figura 31.15b. Continuando a ignorare la radiazione elettromagnetica, possiamo scrivere:

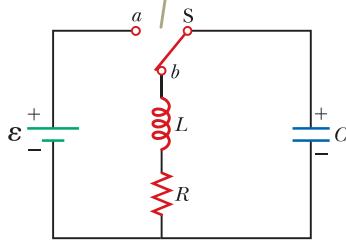
$$\Delta U_E + \Delta U_B + \Delta E_{\text{int}} = 0$$

L'interruttore è in posizione *a* e il condensatore è carico.



a

L'interruttore viene poi commutato nella posizione *b* e cominciano le oscillazioni.



b

**Figura 31.15** Un circuito *RLC* in serie. (a) Con l'interruttore in posizione *a*, il condensatore viene caricato dalla batteria. (b) Quando l'interruttore viene chiuso in posizione *b*, la batteria viene esclusa dal circuito e la corrente nel circuito *RLC* oscilla.

dove l'energia interna è legata all'aumento di temperatura del resistore. Deriviamo questa equazione in funzione del tempo:

$$\frac{dU_E}{dt} + \frac{dU_B}{dt} + \frac{dE_{int}}{dt} = 0$$

Usando le Equazioni 25.13 e 31.12 per risolvere le prime due derivate, e riconoscendo che il terzo termine è la potenza fornita al resistore, si ottiene

$$\frac{q}{C} \frac{dq}{dt} + Li \frac{di}{dt} + i^2 R = 0$$

Ricordando che la corrente nel circuito è uguale alla velocità di variazione della carica nel condensatore, e sostituendo  $i = dq/dt$  e riarrangiando:

$$L \frac{d^2q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = 0 \quad (31.24)$$

Il circuito *RLC* è analogo all'oscillatore armonico smorzato discusso nel Volume I. L'equazione del moto di questo sistema blocco-molla smorzato è

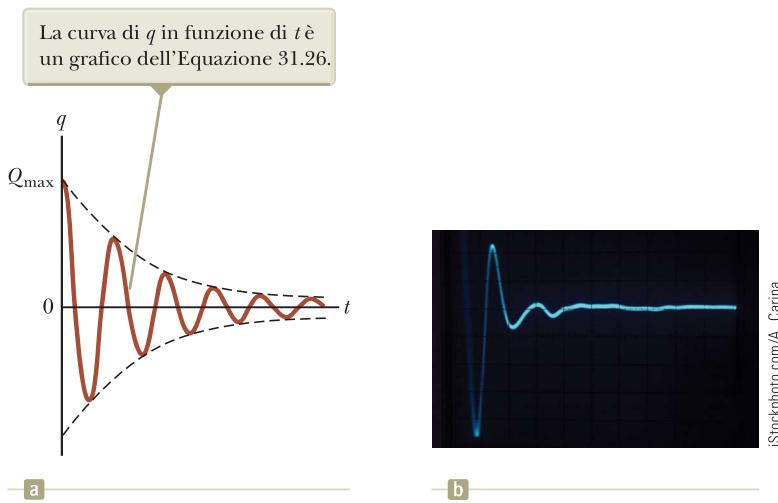
$$m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = 0 \quad (31.25)$$

Confrontando le Equazioni 31.24 e 31.25, si vede che  $q$  corrisponde alla posizione  $x$  del blocco in un generico istante,  $L$  corrisponde alla massa  $m$  del blocco,  $R$  alla costante di smorzamento  $b$  e  $C$  a  $1/k$ , dove  $k$  è la costante elastica della molla. Tutte queste e altre analogie sono elencate nella Tabella 31.1.

Poiché la soluzione analitica dell'Equazione 31.24 è piuttosto laboriosa, daremo solamente una descrizione qualitativa del comportamento del circuito. Nel caso più semplice, in cui  $R = 0$ , l'Equazione 31.24 si riduce, come deve, a *RLC* oscilla.

**TABELLA 31.1** Analogie fra il circuito *RLC* e il punto materiale in moto armonico smorzato

Circuito <i>RLC</i>	Punto materiale in moto armonico smorzato monodimensionale	
Carica	$q \leftrightarrow x$	Posizione
Corrente	$i \leftrightarrow v_x$	Velocità
Differenza di potenziale	$\Delta V \leftrightarrow F_x$	Forza
Resistenza	$R \leftrightarrow b$	Coefficiente di smorzamento viscoso ( $k$ = costante elastica della molla)
Capacità	$C \leftrightarrow 1/k$	
Induttanza	$L \leftrightarrow m$	Massa
Corrente = derivata della carica rispetto al tempo	$i = \frac{dq}{dt} \leftrightarrow v_x = \frac{dx}{dt}$	Velocità = derivata della posizione rispetto al tempo
Velocità di variazione della corrente = derivata seconda della carica rispetto al tempo	$\frac{di}{dt} = \frac{d^2q}{dt^2} \leftrightarrow a_x = \frac{dv_x}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$	Accelerazione = derivata seconda della posizione rispetto al tempo
Energia nell'induttore	$U_B = \frac{1}{2} Li^2 \leftrightarrow K = \frac{1}{2} mv^2$	Energia cinetica della massa in moto
Energia nel condensatore	$U_E = \frac{1}{2} \frac{q^2}{C} \leftrightarrow U = \frac{1}{2} kx^2$	Energia potenziale immagazzinata nella molla
Velocità della perdita di energia dovuta alla resistenza	$i^2 R \leftrightarrow bv^2$	Velocità della perdita di energia dovuta all'attrito
Circuito <i>RLC</i>	$L \frac{d^2q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = 0 \leftrightarrow m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = 0$	Moto smorzato della massa connessa alla molla



**Figura 31.16** (a) Carica in funzione del tempo per un circuito *RLC* smorzato. La carica segue questo andamento smorzato quando  $R < \sqrt{4L/C}$ . (b) Traccia di un oscilloscopio che mostra lo smorzamento dell'oscillazione in un circuito *RLC*.

quella di un circuito *LC* in cui la carica e la corrente oscillano sinusoidalmente nel tempo. Questo comportamento è equivalente a un oscillatore meccanico in cui non ci siano attriti che smorzano le oscillazioni.

Quando  $R$  è piccola, situazione simile a quella di un oscillatore meccanico con un debole smorzamento, la soluzione dell'Equazione 31.24 è

$$q = Q_{\max} e^{-Rt/2L} \cos \omega_d t \quad (31.26)$$

dove  $\omega_d$ , la pulsazione con cui il circuito oscilla, è data da

$$\omega_d = \left[ \frac{1}{LC} - \left( \frac{R}{2L} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (31.27)$$

Ciò vuol dire che la carica sul condensatore oscilla di moto armonico smorzato, in analogia al sistema blocco-molla in moto in un mezzo viscoso. L'Equazione 31.27 mostra che, quando  $R \ll \sqrt{4L/C}$  (cioè quando il secondo termine in parentesi è molto più piccolo del primo), la pulsazione  $\omega_d$  dell'oscillatore smorzato è praticamente uguale a quella dell'oscillatore non smorzato,  $1/\sqrt{LC}$ . Poiché  $i = dq/dt$ , anche la corrente segue un moto armonico smorzato. Un grafico della carica in funzione del tempo per un oscillatore smorzato è mostrato nella Figura 31.16a, mentre la traccia di un oscilloscopio per un circuito reale *RLC* è mostrata nella Figura 31.16b. Il valore massimo di  $q$  diminuisce dopo ogni oscillazione, proprio come diminuisce nel tempo l'ampiezza del sistema blocco-molla in presenza di smorzamento.

Per valori più grandi di  $R$ , si trova che lo smorzamento delle oscillazioni è molto più rapido. C'è, inoltre, un valore critico della resistenza,  $R_c = \sqrt{4L/C}$ , al di sopra del quale non si hanno più oscillazioni. Un sistema in cui  $R = R_c$  si dice *criticamente smorzato*. Quando  $R$  è maggiore di  $R_c$ , si dice che il sistema è *soprasmorzato*.

Riprendiamo adesso la nostra storia introduttiva. Cosa sta succedendo con i cerchi scavati nella strada? In quei cerchi c'è un anello di filo metallico sepolto sotto la superficie. Come abbiamo imparato in questo capitolo, un anello metallico (una spira) funge da induttore. Ogni spira sotto la strada è collegata ad un circuito con dei fili sepolti, visibili come tagli rettilinei nella fotografia. Il circuito è un circuito *RLC*, con l'anello nella strada che funge da induzione primaria  $L$  nel circuito. L'elettronica di controllo pilota il circuito *RLC* con una tensione oscillante in modo che il circuito oscilli alla sua frequenza naturale, data dall'Equazione 31.27. Quando un veicolo si ferma su una spira, l'induttanza del circuito cambia per due motivi: (1) il metallo dell'auto rappresenta un materiale magnetico (Paragrafo 29.6), che altera il campo magnetico che passa attraverso la spira; inoltre, (2) sono indotte nel metallo dell'auto delle correnti parassite (Paragrafo 30.6), che producono linee di campo magnetico aggiuntive attraverso la spira induttiva. La variazione dell'induttanza  $L$  della spira cambia la frequenza naturale di oscillazione del circuito. L'elettronica di controllo rileva questo cambiamento e invia un segnale per cambiare la luce da rossa a verde.

## Sommario

### Concetti e principi

Quando in un circuito la corrente varia nel tempo, in accordo alla legge di Faraday viene indotta una f.e.m. La **f.e.m. autoindotta** è

$$\mathcal{E}_L = -L \frac{di}{dt} \quad (31.1)$$

dove  $L$  è l'**induttanza** del circuito. L'induttanza dà una misura di quanto un circuito elettrico si oppone alla variazione della corrente che passa in esso. Nel SI l'unità di misura dell'induttanza è l'**henry** (H), dove  $1 \text{ H} = 1 \text{ V} \cdot \text{s/A}$ .

L'induttanza di una bobina è

$$L = \frac{N\Phi_B}{i} \quad (31.2)$$

dove  $\Phi_B$  è il flusso magnetico che attraversa ogni spira della bobina ed  $N$  è il numero totale delle spire. L'induttanza di un dispositivo dipende dalla sua forma geometrica. Per esempio, l'induttanza di un solenoide in aria è

$$L = \mu_0 \frac{N^2}{\ell} A \quad (31.4)$$

dove  $A$  è l'area della sezione trasversale del solenoide ed  $\ell$  è la sua lunghezza.

L'energia immagazzinata nel campo magnetico di un induttore in cui circola una corrente  $i$  è

$$U_B = \frac{1}{2} Li^2 \quad (31.12)$$

Questa energia è l'analogo magnetico dell'energia immagazzinata nel campo elettrico di un condensatore carico.

La densità di energia in un punto in cui il campo magnetico è  $B$  è

$$u_B = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (31.14)$$

In un circuito  $LC$  con resistenza nulla che non irraggia onde elettromagnetiche (una situazione ideale), i valori della carica sul condensatore e della corrente nel circuito variano sinusoidalmente con una pulsazione data da

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (31.22)$$

L'energia in un circuito  $LC$  è continuamente convertita tra energia immagazzinata nel condensatore ed energia immagazzinata nell'induttore.

Se nell'istante  $t = 0$  un resistore e un induttore vengono collegati in serie ad una batteria di f.e.m.  $\mathcal{E}$ , la corrente nel circuito varia nel tempo con la legge

$$i = \frac{\mathcal{E}}{R} (1 - e^{-t/\tau}) \quad (31.7)$$

dove  $\tau = L/R$  è la **costante di tempo** del circuito  $RL$ . Se viene esclusa la batteria, rimpiazzandola con un filo di resistenza trascurabile, la corrente diminuisce esponenzialmente nel tempo secondo la legge

$$i = \frac{\mathcal{E}}{R} e^{-t/\tau} \quad (31.10)$$

dove  $\mathcal{E}/R$  è la corrente iniziale nel circuito.

La **mutua induttanza** di un sistema di due bobine è

$$M_{12} = \frac{N_2 \Phi_{12}}{i_1} = M_{21} = \frac{N_1 \Phi_{21}}{i_2} = M \quad (31.15)$$

La mutua induttanza permette di legare la f.e.m. indotta in una bobina alla derivata della corrente che scorre nella bobina vicina, facendo uso delle espressioni

$$\mathcal{E}_2 = -M_{12} \frac{di_1}{dt} \quad \text{e} \quad \mathcal{E}_1 = -M_{21} \frac{di_2}{dt} \quad (31.16, 31.17)$$

In un circuito  $RLC$  con una resistenza sufficientemente piccola, la carica sul condensatore varia nel tempo come

$$q = Q_{\max} e^{-Rt/2L} \cos \omega_d t \quad (31.26)$$

dove

$$\omega_d = \left[ \frac{1}{LC} - \left( \frac{R}{2L} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (31.27)$$

## Riflettere-Discutere-Condividere

Fare riferimento alla Prefazione per la spiegazione del significato delle icone qui utilizzate.

- Un membro del vostro gruppo suggerisce di modificare il circuito  $RL$  nella Figura 31.5a in modo da aggiungere un terzo interruttore  $S_3$  come mostrato nella Figura RD31.1. Chiudete l'interruttore  $S_1$  e posizionate l'interruttore  $S_2$  in  $a$ , lasciando il tempo necessario affinché la corrente nell'induttore abbia raggiunto il suo valore massimo. L'induttore ha una resistenza  $R_L$  nei suoi avvolgimenti. All'istante  $t = 0$ , l'interruttore  $S_3$  viene chiuso. Il membro del gruppo che ha suggerito il circuito sfida il resto del gruppo a discutere e risolvere il seguente problema:

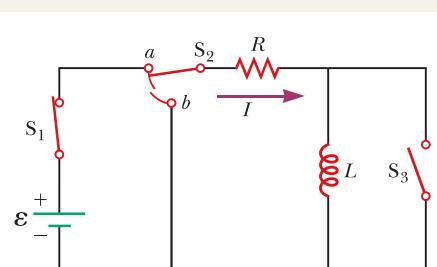


Figura RD31.1



Serway • Jewett

# Fisica

## per Scienze e Ingegneria

Accedi all'**ebook** e ai  
**contenuti digitali** ➤ **Espandi le tue risorse** ➤ con un libro che **non pesa** e si **adatta**  
alle dimensioni del tuo **lettore**



All'interno del volume il **codice personale** e le istruzioni per accedere alla versione **ebook** del testo e agli ulteriori servizi.  
L'accesso alle risorse digitali è **gratuito** ma limitato a **18 mesi dalla attivazione del servizio**.