

Serway • Jewett

Fisica

per Scienze e Ingegneria

Volume Primo

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!**



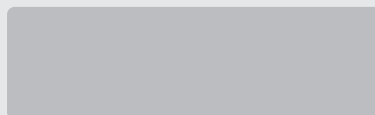
COLLEGATI AL SITO
EDISES.IT

ACCEDI AL
MATERIALE DIDATTICO

SEGUI LE
ISTRUZIONI

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

per Scienze e Ingegneria

VI
EDIZIONE

VOLUME I

Raymond A. Serway

Emeritus, James Madison University

John W. Jewett, Jr.

*Emeritus, California State
Polytechnic University, Pomona*

Con la collaborazione di Vahé Perroomian
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 I – 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

ProMedia Studio di Antonella Leano – Napoli

Stampato presso la

Tipolitografia Petruzzini S.r.l. – Via Venturelli, 7/B – 06012 Città di Castello (PG)

per conto della

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

www.edises.it

assistenza.edises.it

ISBN 978 88 3623 1225

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 1 **Meccanica** 1

- 1 Fisica e misura 1
- 2 Moto in una dimensione 20
- 3 Vettori 52
- 4 Moto in due dimensioni 68
- 5 Leggi del moto 95
- 6 Moto circolare e altre applicazioni delle leggi di Newton 127
- 7 Energia di un sistema 150
- 8 Conservazione dell'energia 181
- 9 Quantità di moto e urti 210
- 10 Rotazione di un corpo rigido attorno ad un asse fisso 249
- 11 Momento angolare 285
- 12 Equilibrio statico ed elasticità 310
- 13 Gravitazione universale 332
- 14 Meccanica dei fluidi 358

PARTE 2 **Oscillazioni e onde meccaniche** 385

- 15 Moto oscillatorio 386
- 16 Moto delle onde 415
- 17 Sovrapposizione e onde stazionarie 451

PARTE 3 **Termodinamica** 481

- 18 Temperatura 482
- 19 Primo principio della termodinamica 501
- 20 Teoria cinetica dei gas 533
- 21 Macchine termiche, entropia e secondo principio della termodinamica 556

Indice generale

Autori VII
Prefazione XI
Per gli studenti XXIII

PARTE 1 Meccanica 1

1 Fisica e misura 2

- 1.1 Campioni di lunghezza, massa e tempo 3
- 1.2 Modellizzazione e rappresentazioni alternative 6
- 1.3 Analisi dimensionale 10
- 1.4 Conversione delle unità di misura 12
- 1.5 Stime e calcoli di ordine di grandezza 12
- 1.6 Cifre significative 13

2 Moto in una dimensione 20

- 2.1 Posizione, velocità e velocità scalare 21
- 2.2 Velocità istantanea e velocità scalare istantanea 24
- 2.3 Modello di analisi: un punto materiale con velocità costante 27
- 2.4 Strategia generale per la risoluzione dei problemi 30
- 2.5 Accelerazione 32
- 2.6 Diagrammi di moto 36
- 2.7 Modello di analisi: un punto materiale con accelerazione costante 37
- 2.8 Corpi in caduta libera 41
- 2.9 Calcolo differenziale applicato alla cinematica 44

3 Vettori 52

- 3.1 Sistemi di coordinate 53
- 3.2 Grandezze vettoriali e grandezze scalari 54
- 3.3 Aritmetica elementare dei vettori 55
- 3.4 Componenti di un vettore e vettori unitari 58

4 Moto in due dimensioni 68

- 4.1 Vettori spostamento, velocità e accelerazione 69
- 4.2 Moto in due dimensioni con accelerazione costante 71
- 4.3 Moto dei proiettili 74
- 4.4 Modello di analisi: punto materiale in moto circolare uniforme 81
- 4.5 Accelerazione tangenziale e radiale 84
- 4.6 Velocità e accelerazione relative 85

5 Leggi del moto 95

- 5.1 Concetto di forza 96
- 5.2 Prima legge di Newton e sistemi inerziali 97
- 5.3 Massa 99
- 5.4 Seconda legge di Newton 99
- 5.5 Forza gravitazionale e peso 102
- 5.6 Terza legge di Newton 103
- 5.7 Modelli di analisi che usano la seconda legge di Newton 105
- 5.8 Forze di attrito 114

6 Moto circolare e altre applicazioni delle leggi di Newton 127

- 6.1 Estensione del modello del punto materiale in moto circolare uniforme 128
- 6.2 Moto circolare non uniforme 133
- 6.3 Moto in sistemi di riferimento accelerati 135
- 6.4 Moto in presenza di forze frenanti 138

7 Energia di un sistema 150

- 7.1 Sistemi e ambiente esterno 151
- 7.2 Lavoro compiuto da una forza costante 151
- 7.3 Prodotto scalare tra due vettori 154
- 7.4 Lavoro compiuto da una forza variabile 156
- 7.5 Energia cinetica e teorema dell'energia cinetica 161
- 7.6 Energia potenziale di un sistema 165
- 7.7 Forze conservative e non conservative 169
- 7.8 Relazione tra forze conservative ed energia potenziale 171
- 7.9 Diagrammi energetici ed equilibrio di un sistema 173

8 Conservazione dell'energia 181

- 8.1 Modello di analisi: sistema non isolato (energia) 182
- 8.2 Modello di analisi: sistema isolato (energia) 185
- 8.3 Sistemi con attrito dinamico 191
- 8.4 Forze non conservative e variazioni di energia meccanica 196
- 8.5 Potenza 200

9 Quantità di moto e urti 210

- 9.1 Quantità di moto 211
- 9.2 Modello di analisi: sistema isolato (quantità di moto) 213
- 9.3 Modello di analisi: sistema non isolato (quantità di moto) 215
- 9.4 Urti in una dimensione 219

- 9.5 Urti in due dimensioni 227
- 9.6 Centro di massa 230
- 9.7 Sistemi di punti materiali 234
- 9.8 Sistemi deformabili 237
- 9.9 Propulsione di un razzo 239

10 Rotazione di un corpo rigido attorno ad un asse fisso 249

- 10.1 Posizione angolare, velocità angolare e accelerazione angolare 250
- 10.2 Modello di analisi: corpo rigido con accelerazione angolare costante 252
- 10.3 Variabili angolari e variabili lineari 254
- 10.4 Momento di una forza 257
- 10.5 Modello di analisi: corpo rigido soggetto ad un momento risultante 259
- 10.6 Calcolo di momenti di inerzia 263
- 10.7 Energia cinetica di rotazione 267
- 10.8 Considerazioni energetiche nel moto rotatorio 269
- 10.9 Rotolamento di un corpo rigido 272

11 Momento angolare 285

- 11.1 Prodotto vettoriale e momento di una forza 286
- 11.2 Modello di analisi: sistema non isolato (momento angolare) 288
- 11.3 Momento angolare di un corpo rigido in rotazione 293
- 11.4 Modello di analisi: sistema isolato (momento angolare) 295
- 11.5 Moto di giroscopi e trottole 301

12 Equilibrio statico ed elasticità 310

- 12.1 Modello di analisi: corpo rigido in equilibrio 311
- 12.2 Ancora sul baricentro 312
- 12.3 Esempi di corpi rigidi in equilibrio statico 313
- 12.4 Proprietà elastiche dei solidi 319

13 Gravitazione universale 332

- 13.1 Legge di gravitazione universale di Newton 333
- 13.2 Accelerazione di caduta libera e forza gravitazionale 335
- 13.3 Modello di analisi: punto materiale in un campo (campo gravitazionale) 336
- 13.4 Leggi di Keplero e moto dei pianeti 339
- 13.5 Energia potenziale gravitazionale 345
- 13.6 Considerazioni energetiche nel moto dei pianeti e dei satelliti 347

14 Meccanica dei fluidi 358

- 14.1 Pressione 359
- 14.2 Variazione della pressione con la profondità 360
- 14.3 Misure di pressione 364
- 14.4 Spinta di Archimede e principio di Archimede 365
- 14.5 Dinamica dei fluidi 368
- 14.6 Equazione di Bernoulli 371

- 14.7 Flusso dei fluidi viscosi nei tubi 375
- 14.8 Altre applicazioni di fluidodinamica 377

PARTE 2

Oscillazioni e onde meccaniche 385

15 Moto oscillatorio 386

- 15.1 Moto di un corpo attaccato ad una molla 387
- 15.2 Modello di analisi: punto materiale in moto armonico 388
- 15.3 Energia di un oscillatore armonico 394
- 15.4 Confronto fra il moto armonico e il moto circolare uniforme 398
- 15.5 Pendolo 400
- 15.6 Oscillazioni smorzate 404
- 15.7 Oscillazioni forzate 405

16 Moto delle onde 415

- 16.1 Propagazione di una perturbazione 416
- 16.2 Modelli di analisi: onda progressiva 419
- 16.3 Velocità delle onde sulle corde 423
- 16.4 Velocità di trasferimento di energia attraverso le onde sinusoidali sulle corde 426
- 16.5 Equazione lineare delle onde 428
- 16.6 Onde sonore 429
- 16.7 Velocità delle onde sonore 431
- 16.8 Intensità delle onde sonore 433
- 16.9 Effetto Doppler 438

17 Sovrapposizione e onde stazionarie 451

- 17.1 Modello di analisi: interferenza tra onde 452
- 17.2 Onde stazionarie 456
- 17.3 Effetti delle condizioni al contorno: riflessione e trasmissione 459
- 17.4 Modello di analisi: onde in presenza di condizioni al contorno 461
- 17.5 Risonanza 465
- 17.6 Onde stazionarie in colonne d'aria 466
- 17.7 Battimenti: interferenza temporale 469
- 17.8 Forme d'onda non sinusoidali 472

PARTE 3

Termodinamica 481

18 Temperatura 482

- 18.1 Temperatura e principio zero della termodinamica 483
- 18.2 Termometri e scala Celsius delle temperature 484
- 18.3 Termometro a gas a volume costante e scala assoluta delle temperature 485
- 18.4 Dilatazione termica di solidi e liquidi 488

- 18.5 Descrizione macroscopica di un gas perfetto 492

19 Primo principio della termodinamica 501

- 19.1 Calore ed energia interna 502
19.2 Calore specifico e calorimetria 505
19.3 Calore latente 509
19.4 Lavoro nelle trasformazioni termodinamiche 513
19.5 Primo principio della termodinamica 514
19.6 Meccanismi di scambio di energia nei processi termici 518

20 Teoria cinetica dei gas 533

- 20.1 Modello molecolare di un gas perfetto 534
20.2 Calore specifico molare di un gas perfetto 539
20.3 Equipartizione dell'energia 542
20.4 Trasformazioni adiabatiche di un gas perfetto 545
20.5 Distribuzione delle velocità molecolari 547

21 Macchine termiche, entropia e secondo principio della termodinamica 556

- 21.1 Macchine termiche e secondo principio della termodinamica 557
21.2 Pompe di calore e frigoriferi 559
21.3 Trasformazioni reversibili e irreversibili 562
21.4 Macchina di Carnot 563
21.5 Motori a benzina e motori Diesel 567
21.6 Entropia 570
21.7 Entropia nei sistemi termodinamici 572
21.8 Entropia e secondo principio 578

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:

Ezio Bruno *Università degli Studi di Messina*

Edvige Celasco *Università degli Studi di Genova*

Elisabetta Comini *Università degli Studi di Brescia*

Elena Degoli *Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia*

Mauro Fasoli *Università degli Studi di Milano Bicocca*

Paolo Lenisa *Università degli Studi di Ferrara*

Pasquina Marzola *Università degli Studi di Verona*

Federico Pirzio *Università degli Studi di Pavia*

Prefazione

Nella 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 17 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 ) 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 coinvolgere 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 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, confidante 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 stata spostata 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 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 comprimendo la molla di un tratto x . Una seconda freccetta viene inserita comprimendo 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 lunga 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 β 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 β 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 SE? 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.

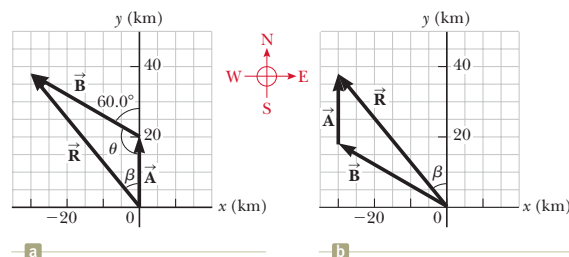


Figura 3.11 (Esempio 3.2) (a) Metodo grafico per trovare lo spostamento risultante $\vec{R} = \vec{A} + \vec{B}$. (b) Se i vettori vengono sommati in ordine invertito ($\vec{B} + \vec{A}$) il risultante è ancora \vec{R} .

Ogni soluzione è stata scritta in modo da seguire fedelmente la strategia per la risoluzione dei problemi presentata nel Capitolo 2, in modo tale da rafforzare le buone abitudini relative alla risoluzione dei problemi.

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

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.

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**.

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

- 35.** Una molla disposta orizzontalmente con un'estremità fissata 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)?

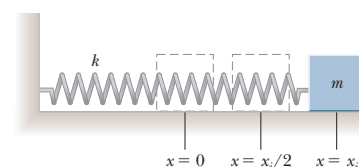


Figura P8.35

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**.

Nel testo del problema non compaiono numeri.

- 36.** Un camioncino si sta muovendo con accelerazione costante a su di un pendio che forma un angolo ϕ 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 θ con la retta perpendicolare al soffitto, quanto vale a ?

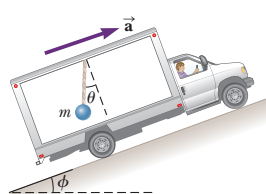


Figura P6.36

La figura mostra solo grandezze simboliche.

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

La risposta del problema è meramente simbolica.

PG 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 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 scompone 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.

- 24.** Una trave omogenea di lunghezza $L = 6.00$ m e massa $M = 90.0$ 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 $\ell = 4.00$ m dal primo, esercita una forza normale n_2 . Una donna di massa $m = 55.0$ 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.

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.

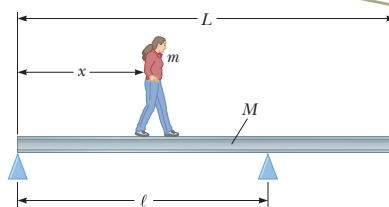


Figura P12.24

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.

La frase iniziale in corsivo segnala un problema di impossibilità.

39. *Perché ciò è impossibile?* Albert Pujols scaglia un fuoricampo che va a sfiorare la fila più alta delle gradinate a 24.0 m di altezza e a 130 m dal punto di battuta. La velocità impressa alla palla è di 41.7 m/s ad un angolo di 35.0° rispetto all'orizzontale. La resistenza con l'aria è trascurabile.

Viene descritta una situazione.

Non viene posto alcun quesito. Lo studente deve determinare ciò che è necessario per il calcolo e il motivo per cui la situazione è impossibile.

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 retino 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.

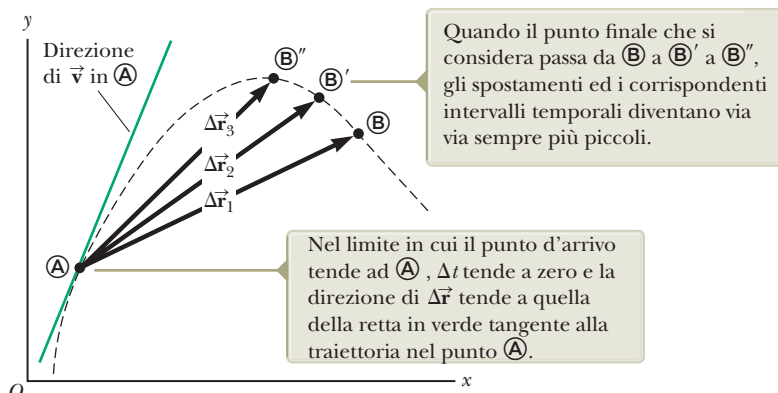


Figura 4.2 Quando un punto materiale si sposta da un punto ad un altro, la sua velocità media ha la direzione del vettore spostamento $\Delta\vec{r}$. Per definizione, la velocità istantanea ha la direzione della retta tangente alla curva in A.

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 I senza perdite di continuità. I paragrafi che, in tal senso, possono essere considerati opzionali sono i seguenti:

2.9	Calcolo differenziale applicato alla cinematica	11.5	Moto di giroscopi e trottole
4.6	Velocità e accelerazione relative	14.8	Alcune applicazioni di fluidodinamica
6.3	Moto in sistemi di riferimento accelerati	15.6	Oscillazioni smorzate
6.4	Moto in presenza di forze frenanti	15.7	Oscillazioni forzate
7.9	Diagrammi energetici ed equilibrio di un sistema	17.8	Forme d'onda non sinusoidali
9.9	Propulsione di un razzo		

Per gli studenti

È 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 riletture 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 ogniqualvolta 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



Moto in due dimensioni

STORIA INTRODUTTIVA

Nel capitolo precedente, eri in

Paragoniamo le traiettorie: di un ragazzo che salta da una scogliera; delle scintille generate da un saldatore; dell'acqua proiettata in una fontanella nel parco; dei getti di una fontana d'acqua.

(Top Left: André Berg/EyeEm/Getty Images; Top Right: wi6995/Shutterstock.com; Bottom Right: Kristina Postnikova/Shutterstock.com; Bottom Left: Flashon Studio/Shutterstock.com)

- 4.1 Vettori spostamento, velocità e accelerazione
- 4.2 Moto in due dimensioni con accelerazione costante
- 4.3 Moto dei proiettili
- 4.4 Modello di analisi: punto materiale in moto circolare uniforme
- 4.5 Accelerazione tangenziale e radiale
- 4.6 Velocità e accelerazione relative

navigazione su una barca a vela verso l'isola di Catalina. Adesso ti stai avvicinando all'isola e noti che alcuni adolescenti stanno facendo dei tuffi da una scogliera. Fotografi con il tuo smartphone un ragazzo mentre percorre la sua traiettoria. Utilizzando un'app speciale, combini le molte foto scattate in un'unica foto, in modo da poter visualizzare contemporaneamente più immagini del ragazzo durante la caduta. Sembra che egli segua un percorso di una forma particolare. Che forma pensi possa essere? Entrando nel porto dell'isola di Catalina, vedi un saldatore che sta eseguendo delle riparazioni su una barca di metallo. Vengono generate molte scintille. Osservi i percorsi delle singole scintille e ti soffermi sulla loro forma. A riva, in un parco, si scorge una fontana in cui i getti d'acqua sono proiettati secondo un certo angolo nell'aria e seguono una determinata forma quando ritornano verso il suolo. Bevi da una fontanella e noti la forma dell'acqua proiettata dalla fontanella. Qual è la forma che si osserva in tutti questi esempi?

COLLEGAMENTI Nel Capitolo 2 abbiamo studiato il moto in una dimensione. Nel Capitolo 3, abbiamo discusso sulle grandezze vettoriali in generale, della somma di vettori e delle componenti vettoriali. Ci siamo concentrati sui vettori di posizione. In questo capitolo vedremo come utilizzare i vettori del Capitolo 3 per modificare le espressioni matematiche relative alla posizione, alla velocità e all'accelerazione del Capitolo 2, per tenere conto del moto in due dimensioni. Studieremo due importanti tipi di moto bidimensionale: il moto di un proiettile, come quello di una palla da baseball o di un ragazzo che si tuffa, e il moto circolare, come il moto idealizzato di un pianeta intorno a una stella. In questo capitolo analizzeremo anche il concetto di moto relativo, che mostra perché gli osservatori in diversi sistemi di riferimento possono misurare posizioni e velocità diverse per una data particella. Questo capitolo completerà la discussione riguardante i modi di descrivere il moto di una particella e sarà preparatoria per la comprensione del Capitolo 5, in cui studieremo le cause del cambio di moto di una particella.

4.1 Vettori spostamento, velocità e accelerazione

In una dimensione un solo valore numerico descrive la posizione di un punto materiale mentre in due dimensioni la sua posizione è descritta dal **vettore posizione** \vec{r} che parte dall'origine di un qualche sistema di coordinate e arriva nel punto del piano xy dove si trova il punto materiale, come mostrato in Figura 4.1. Nell'istante t_i il punto materiale si trova in \textcircled{A} , il cui vettore posizione è \vec{r}_i , e in un istante successivo t_f il punto materiale si trova in \textcircled{B} , descritto dal vettore posizione \vec{r}_f . La traiettoria fra \textcircled{A} a \textcircled{B} non è necessariamente rettilinea. Quando il punto materiale si muove da \textcircled{A} a \textcircled{B} nell'intervallo di tempo $\Delta t = t_f - t_i$, il suo vettore posizione cambia da \vec{r}_i ad \vec{r}_f . Come abbiamo imparato nel Capitolo 2, lo spostamento è un vettore, dato dalla differenza fra la posizione finale e la posizione iniziale della particella. Possiamo quindi ora definire formalmente il **vettore spostamento** $\Delta\vec{r}$ per il punto materiale il cui moto è illustrato nella Figura 4.1 come la differenza fra il vettore che ne rappresenta la posizione finale e il vettore che ne rappresenta la posizione iniziale:

$$\Delta\vec{r} \equiv \vec{r}_f - \vec{r}_i \quad (4.1)$$

La direzione di $\Delta\vec{r}$ è indicata in Figura 4.1. Come evidente dalla figura, il modulo del vettore spostamento $\Delta\vec{r}$ è *minore* della distanza effettivamente percorsa dal punto materiale lungo il percorso curvilineo.

Come abbiamo discusso nel Capitolo 2, spesso è conveniente descrivere quantitativamente un moto utilizzando il rapporto fra lo spostamento e l'intervallo di tempo necessario per realizzare tale spostamento che fornisce la rapidità con cui varia la posizione. Per un moto bidimensionale o tridimensionale non c'è alcuna differenza rispetto al caso del moto unidimensionale, tranne per il fatto che adesso dobbiamo utilizzare i vettori e non semplicemente i segni positivo e negativo per indicare la direzione e il verso di un moto.

Definiamo quindi la **velocità media** \vec{v}_{media} di un punto materiale durante l'intervallo di tempo Δt come il rapporto fra lo spostamento e l'intervallo di tempo necessario per realizzare questo spostamento:

$$\vec{v}_{\text{media}} \equiv \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} \quad (4.2)$$

Se si moltiplica o si divide una grandezza vettoriale per una quantità scalare come Δt , cambia solo l'intensità del vettore, ma non la sua direzione. Pertanto, poiché lo spostamento è un vettore e l'intervallo di tempo è uno scalare, concludiamo che la velocità media è un vettore diretto lungo $\Delta\vec{r}$.

Si noti che la velocità media è *indipendente dal percorso*. Ciò è vero in quanto la velocità media è proporzionale allo spostamento, che a sua volta dipende solamente dai vettori posizione iniziale e finale e non dal cammino percorso. Come nel caso del moto unidimensionale, concludiamo che, se un punto materiale inizia il suo moto in un certo punto e ritorna in questo punto compiendo un percorso arbitrario, la sua velocità media è nulla in quanto il suo spostamento è nullo. Prendiamo di nuovo in esame i giocatori di basket della Figura 2.2. Inizialmente abbiamo considerato il loro moto come unidimensionale (avanti/indietro) tra i due canestri. In realtà si tratta di un moto su di una superficie bidimensionale: non solo avanti e indietro, ma anche verso destra o verso sinistra lungo tutta la larghezza del campo di gioco. Partendo da un canestro, un giocatore può compiere una traiettoria bidimensionale complicata a piacere. Ma nel momento in cui il giocatore ritorna al canestro di partenza, la sua velocità media è nulla, perché lo spostamento totale risulta zero.

Consideriamo ancora il moto di un punto materiale fra due punti nel piano xy come in Figura 4.2. La linea tratteggiata rappresenta la traiettoria del punto materiale. Allorquando gli intervalli di tempo, durante i quali si osserva il moto, diventano sempre più piccoli, e cioè quando \textcircled{B} va verso \textcircled{B}' e poi verso \textcircled{B}'' , la direzione dello spostamento tende a quella della tangente alla traiettoria nel punto \textcircled{A} . La **velocità istantanea** \vec{v} , è definita come il limite della velocità media $\Delta\vec{r}/\Delta t$ allorquando Δt tende a zero:

$$\vec{v} \equiv \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt} \quad (4.3)$$

◀ Vettore spostamento
(si confronti con l'Equazione 2.1)

◀ Velocità media
(si confronti con l'Equazione 2.2)

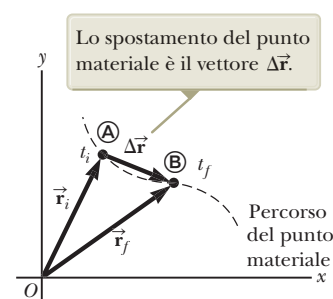
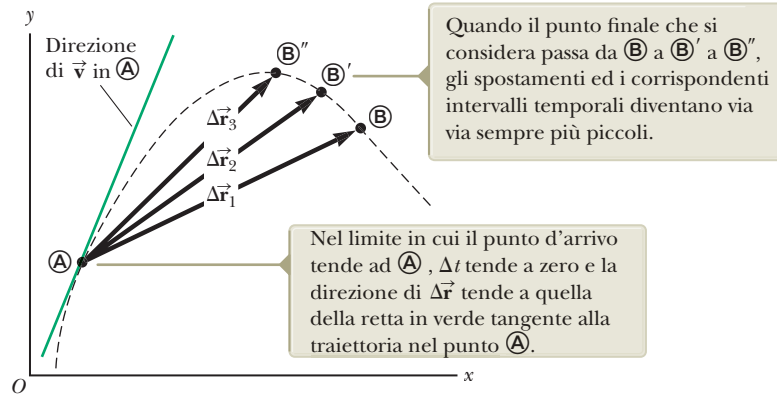


Figura 4.1 La posizione di un punto materiale nel piano xy è definita dal vettore posizione \vec{r} , che parte dal punto origine e termina sul punto materiale in movimento. Lo spostamento da \textcircled{A} a \textcircled{B} del punto materiale durante l'intervallo di tempo $\Delta t = t_f - t_i$ è uguale al vettore $\Delta\vec{r} = \vec{r}_f - \vec{r}_i$.

◀ Velocità istantanea
(si confronti con l'Equazione 2.5)

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} .



In altre parole, la velocità istantanea nel punto \textcircled{A} è uguale alla derivata del vettore posizione rispetto al tempo, valutata nel punto \textcircled{A} . La direzione del vettore velocità istantanea in un punto è quella della retta tangente alla traiettoria in quel punto ed è orientata nel verso del moto.

La grandezza del vettore velocità istantanea di un punto materiale $v = |\vec{v}|$ è definita *velocità* di un punto materiale, che è una grandezza scalare.

Quando un punto materiale si muove fra due punti lungo un percorso arbitrario, il suo vettore velocità istantanea cambia da \vec{v}_i al tempo t_i a \vec{v}_f al tempo t_f . Conoscendo la velocità in ciascuno dei due punti possiamo determinare l'accelerazione media. L'**accelerazione media** \vec{a}_{media} di un punto materiale quando si muove fra due punti è definita come il rapporto fra la variazione del vettore velocità istantanea $\Delta \vec{v}$ ed il tempo Δt intercorso durante il moto:

$$\vec{a}_{\text{media}} \equiv \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{\vec{v}_f - \vec{v}_i}{t_f - t_i} \quad (4.4)$$

Accelerazione media ►
(si confronti con l'Equazione 2.9)

Poiché l'accelerazione media è il rapporto di un vettore, $\Delta \vec{v}$, e di uno scalare positivo, Δt , concludiamo che l'accelerazione media \vec{a}_{media} è un vettore, diretto lungo $\Delta \vec{v}$. Come indicato in Figura 4.3, la direzione di $\Delta \vec{v}$ si ottiene aggiungendo il vettore $-\vec{v}_i$ (l'opposto di \vec{v}_i) al vettore \vec{v}_f in quanto per definizione $\Delta \vec{v} = \vec{v}_f - \vec{v}_i$. Si confronti l'Equazione 4.4 con l'Equazione 2.9.

Nei casi in cui l'accelerazione media di un punto materiale cambia se calcolata su intervalli di tempo diversi, è utile definire l'accelerazione istantanea \vec{a} . L'**accelerazione istantanea** \vec{a} è definita come il valore limite del rapporto $\Delta \vec{v} / \Delta t$ quando Δt tende a zero:

$$\vec{a} \equiv \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (4.5)$$

Accelerazione istantanea ►
(si confronti con l'Equazione 2.10)

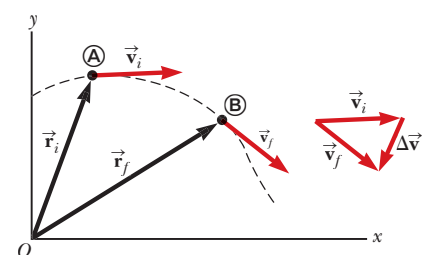
In altre parole, il vettore accelerazione istantanea è uguale alla derivata del vettore velocità rispetto al tempo.

I cambiamenti negli aspetti del moto prodotti da una accelerazione sono molteplici. Innanzitutto, come nel caso del moto rettilineo (unidimensionale), è il modulo della velocità che può variare nel tempo. Un secondo caso è quello in cui è la direzione della velocità a variare nel tempo, mentre il modulo rimane costante, come può accadere lungo una traiettoria curva bidimensionale. Infine, l'accelerazione può essere dovuta ad una variazione simultanea del modulo e della direzione del vettore velocità.

PREVENIRE L'ERRORE 4.1

Somma di vettori La somma di vettori discussa nel Capitolo 3 riferita a vettori *spostamento*, è una operazione che può essere applicata a vettori di tipo qualunque. Un esempio è mostrato nella Figura 4.3 dove la somma, effettuata con il metodo grafico, viene applicata a vettori *velocità*.

Figura 4.3 Un punto materiale si muove dalla posizione \textcircled{A} alla posizione \textcircled{B} . Il suo vettore velocità istantanea cambia da \vec{v}_i a \vec{v}_f . Il diagramma vettoriale nella parte in alto a destra della figura un modo per determinare il vettore $\Delta \vec{v}$ partendo dalle velocità iniziale e finale.



- QUIZ 4.1** Si prendano in esame i seguenti comandi di una automobile: il
- pedale del gas, il pedale del freno, il volante. Quali comandi, se azionati,
 - generano un'accelerazione dell'automobile? (a) Tutti e tre i comandi; (b) il
 - pedale del gas ed il freno; (c) solo il freno; (d) solo il pedale del gas; (e) solo il
 - volante.

4.2 Moto in due dimensioni con accelerazione costante

Il moto con accelerazione costante è già stato studiato nel Paragrafo 2.7 nel caso unidimensionale. Prendiamo ora in esame il moto bidimensionale di un punto materiale la cui accelerazione rimane costante sia in modulo che in direzione e verso. Come vedremo in seguito questa analisi sarà adattabile a molti moti reali.

Nel Paragrafo 4.1, abbiamo considerato i vettori posizione di un punto materiale e li abbiamo rappresentati mediante frecce. Ricordiamo ora la discussione sulle componenti dei vettori affrontata nel Paragrafo 3.4. Consideriamo un punto materiale nel piano xy in una posizione con coordinate cartesiane (x, y) come nella Figura 4.4. Il punto può essere specificato dal vettore posizione \vec{r} , che in forma di vettore unitario è dato da

$$\vec{r} = x\hat{i} + y\hat{j}. \quad (4.6)$$

dove x , y e \vec{r} cambiano nel tempo con lo spostamento del punto materiale, mentre i vettori unitari \hat{i} e \hat{j} restano costanti.

Prima di iniziare questo esame dobbiamo mettere in luce una caratteristica molto importante dei moti bidimensionali. Immaginiamo un disco da hockey che si sta muovendo in linea retta su di un tavolo ad aria perfettamente privo di attrito. Una vista dall'alto del moto del disco è mostrata nella Figura 4.5a. Si rammenti che nel Paragrafo 2.4 abbiamo associato l'accelerazione di un corpo alla presenza di una forza che agisce sul corpo. Nel nostro caso, non essendoci forze che agiscono nel piano orizzontale, il disco si muoverà con velocità costante lungo l'asse x . Si supponga adesso che il disco che ci sta passando davanti venga colpito da uno sbuffo d'aria che, per un tempo brevissimo, sottopone il disco ad una forza orientata *esattamente* come l'asse y . Dal momento che questa forza non ha componenti lungo l'asse x non ci sarà accelerazione lungo questo asse mentre il disco acquisterà una componente della velocità lungo l'asse y , a causa della momentanea accelerazione dovuta allo sbuffo; questa componente si manterrà costante una volta cessato il soffio d'aria. La Figura 4.5b mostra che anche la componente x della velocità continuerà a mantenersi costante. Questo esperimento molto semplice può essere generalizzato: **il moto in due dimensioni può essere modellizzato come due moti indipendenti lungo ciascuna delle due direzioni ortogonali che possono essere associate agli assi x e y . Qualunque azione in direzione x non influenza il moto in direzione y e viceversa.**

Il vettore posizione per un punto materiale che si muove nel piano xy può essere scritto come dove x , y ed \vec{r} variano nel tempo durante il moto del punto materiale,

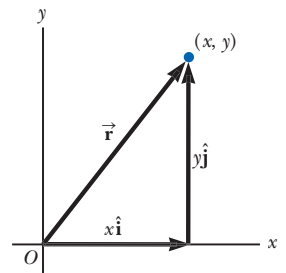


Figura 4.4 Il punto con coordinate cartesiane (x, y) può essere rappresentato dal vettore posizione $\vec{r} = x\hat{i} + y\hat{j}$.

Si notino i vettori rossi orizzontali, che rappresentano la componente x della velocità: sono tutti della stessa lunghezza e rimangono uguali passando dalla parte superiore della figura a quella inferiore. Questo fa capire come un modello del moto in due dimensioni sia quello di due moti indipendenti che si svolgono lungo due direzioni perpendicolari.

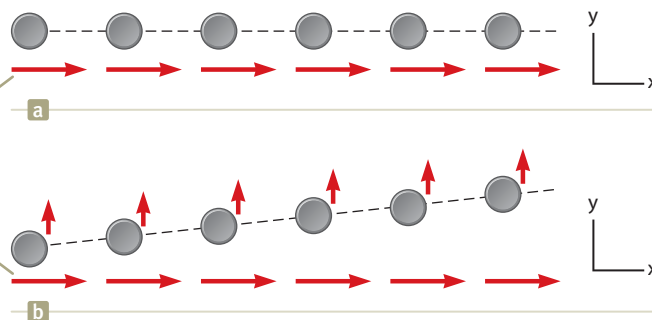


Figura 4.5 (a) Un disco da hockey che si muove su una tavola ad aria con velocità costante in direzione x . (b) Un soffio d'aria applicato al disco per un istante, gli fa acquistare una componente y della velocità mentre la componente x non viene influenzata dalla forza applicata perpendicolarmente ad x .

mentre versori \hat{i} e \hat{j} restano costanti. Se il vettore posizione è noto, la velocità del punto materiale può essere ottenuta dalle Equazioni 4.3 e 4.6 da cui si ricava:

$$\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{dx}{dt}\hat{i} + \frac{dy}{dt}\hat{j} = v_x\hat{i} + v_y\hat{j} \quad (4.7)$$

Poiché l'accelerazione \vec{a} è ipotizzata costante, anche le sue componenti a_x ed a_y sono costanti. Pertanto possiamo utilizzare il modello punto materiale con accelerazione costante indipendentemente per le due direzioni e applicare separatamente le equazioni della cinematica ad entrambe le componenti x ed y del vettore velocità. Sostituendo $v_{xf} = v_{xi} + a_x t$ e $v_{yf} = v_{yi} + a_y t$ (Eq. 2.13) nella Equazione 4.7 per determinare la velocità finale ad ogni istante t , si ottiene

$$\vec{v}_f = (v_{xi} + a_x t)\hat{i} + (v_{yi} + a_y t)\hat{j} = (v_{xi}\hat{i} + v_{yi}\hat{j}) + (a_x\hat{i} + a_y\hat{j})t$$

$$\vec{v}_f = \vec{v}_i + \vec{a}t \quad (\text{per } \vec{a} \text{ costante}) \quad (4.8)$$

Vettore velocità in funzione del tempo per un punto materiale con accelerazione costante in due dimensioni (si confronti con l'Equazione 2.13)

Questo risultato mostra che la velocità di un punto materiale ad un certo istante t è uguale alla somma vettoriale della sua velocità iniziale \vec{v}_i e della velocità addizionale $\vec{a}t$ che acquista nel tempo t per effetto della sua accelerazione costante.

Analogamente, dall'Equazione 2.16 sappiamo che le coordinate x ed y di un punto materiale in moto con accelerazione costante sono date da

$$x_f = x_i + v_{xi}t + \frac{1}{2}a_x t^2 \quad y_f = y_i + v_{yi}t + \frac{1}{2}a_y t^2$$

Sostituendo queste espressioni nell'Equazione 4.6 (e indicando con \vec{r}_f il vettore posizione finale) si ottiene

$$\begin{aligned} \vec{r}_f &= (x_i + v_{xi}t + \frac{1}{2}a_x t^2)\hat{i} + (y_i + v_{yi}t + \frac{1}{2}a_y t^2)\hat{j} \\ &= (x_i\hat{i} + y_i\hat{j}) + (v_{xi}\hat{i} + v_{yi}\hat{j})t + \frac{1}{2}(a_x\hat{i} + a_y\hat{j})t^2 \end{aligned}$$

$$\vec{r}_f = \vec{r}_i + \vec{v}_i t + \frac{1}{2}\vec{a}t^2 \quad (\text{per } \vec{a} \text{ costante}) \quad (4.9)$$

Vettore posizione in funzione del tempo per un punto materiale con accelerazione costante in due dimensioni (si confronti con l'Equazione 2.16)

L'equazione 4.9 afferma che il vettore posizione \vec{r}_f di un punto materiale è la somma vettoriale del vettore posizione iniziale \vec{r}_i , di uno spostamento $\vec{v}_i t$, dovuto alla velocità iniziale della particella, e di uno spostamento addizionale $\frac{1}{2}\vec{a}t^2$, prodotto dall'accelerazione costante della particella.

Le Equazioni 4.8 e 4.9, che sono la rappresentazione matematica del modello punto materiale con accelerazione costante in due dimensioni, sono rappresentate nella Figura 4.6 che mostra anche le componenti della velocità e della posizione.

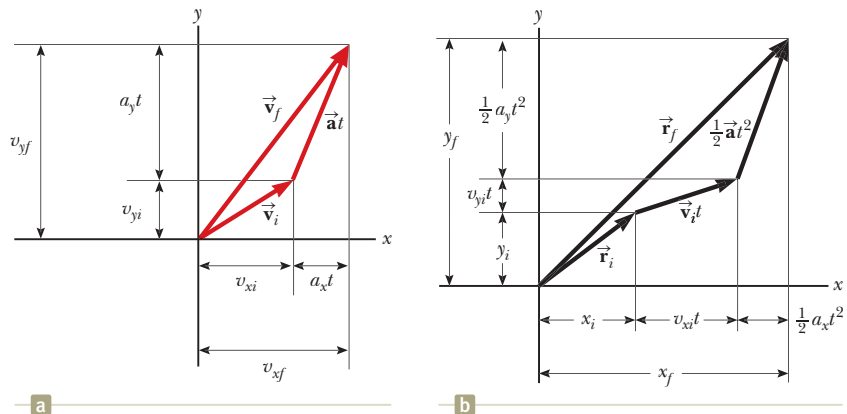


Figura 4.6 Rappresentazione vettoriale e componenti di (a) velocità e (b) posizione di un punto materiale in moto con accelerazione costante.

Esempio 4.1 Moto in un piano

Un punto materiale parte dall'origine a $t = 0$ con una velocità iniziale di componente x 20 m/s e di componente y -15 m/s. Il punto materiale si muove nel piano xy con una accelerazione che ha solo componente x data da $a_x = 4.0 \text{ m/s}^2$.

(A) Si determini il vettore velocità in ogni istante di tempo.

SOLUZIONE

Concettualizzare Le componenti della velocità iniziale indicano che la particella incomincia a spostarsi verso destra e verso il basso. La componente x della velocità parte da un valore di 20 m/s e aumenta di 4.0 m/s ogni secondo, mentre la componente y non cambia e rimane fissa al suo valore iniziale di -15 m/s. Questa situazione è visualizzata nello schizzo mostrato in Figura 4.7. Dal momento che l'accelerazione ha il verso di x positivo, la componente della velocità lungo questa direzione aumenterà per cui la traiettoria avrà la curvatura che appare nello schizzo. Si noti che, a causa del progressivo aumento del modulo della velocità, anche la spaziatura fra le posizioni successive della particella va aumentando. La Figura 4.7 riassume tutti gli aspetti che sono essenziali per la concettualizzazione del problema.

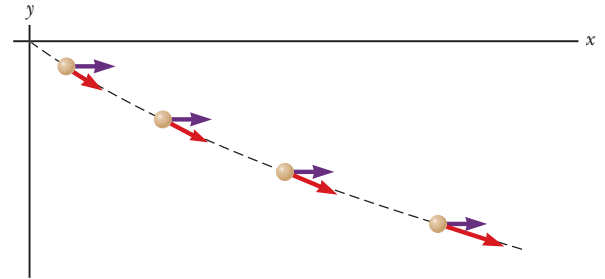


Figura 4.7 (Esempio 4.1) Diagramma del moto della particella. I vettori velocità sono indicati in rosso e i vettori accelerazione sono indicati in viola.

Classificare La velocità iniziale ha componenti x ed y e l'accelerazione ha solo componente x . Il problema rientra nella famiglia dei moti in due dimensioni e il modello adatto è *il punto materiale in moto con accelerazione costante lungo x e con velocità costante lungo y* .

Analizzare Per incominciare a matematizzare il problema poniamo $v_{xi} = 20 \text{ m/s}$, $v_{yi} = -15 \text{ m/s}$, $a_x = 4.0 \text{ m/s}^2$, e $a_y = 0$.

Per il vettore velocità si può allora usare l'Equazione 4.8:

$$\vec{v}_f = \vec{v}_i + \vec{a}t = (v_{xi} + a_x t)\hat{i} + (v_{yi} + a_y t)\hat{j}$$

Si sostituiscono i valori numerici con la velocità in metri al secondo e il tempo in secondi:

$$\vec{v}_f = [20 + (4.0)t]\hat{i} + [-15 + (0)t]\hat{j}$$

$$(1) \quad \vec{v}_f = [(20 + 4.0t)\hat{i} - 15\hat{j}]$$

Concludere Si noti che la componente x della velocità cresce nel tempo, mentre la componente y rimane costante; questo risultato è in accordo con le nostre previsioni.

(B) Si calcoli il vettore velocità e il suo modulo al tempo $t = 5.0 \text{ s}$ e l'angolo tra il vettore velocità e l'asse x .

SOLUZIONE**Analizzare**

Dall'Equazione (1) al tempo $t = 5.0 \text{ s}$ si ricava:

$$\vec{v}_f = [(20 + 4.0(5.0))\hat{i} - 15\hat{j}] = (40\hat{i} - 15\hat{j}) \text{ m/s}$$

L'angolo θ che \vec{v}_f forma con l'asse x al tempo $t = 5.0 \text{ s}$ è:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{v_{yf}}{v_{xf}}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{-15 \text{ m/s}}{40 \text{ m/s}}\right) = -21^\circ$$

Il modulo della velocità \vec{v}_f è:

$$v_f = |\vec{v}_f| = \sqrt{v_{xf}^2 + v_{yf}^2} = \sqrt{(40)^2 + (-15)^2} \text{ m/s} = 43 \text{ m/s}$$

Concludere Il segno negativo attribuito all'angolo θ indica che il vettore velocità è orientato di 21° verso il basso rispetto all'asse x . Se si fosse calcolato il modulo v_i dalle componenti x e y della velocità iniziale \vec{v}_i , si sarebbe trovato che $v_f > v_i$. Questo risultato si accorda con le previsioni?

continua

4.1 continua

(C) Si determinino le coordinate x ed y ad un generico istante t ed il vettore posizione a questo istante.

SOLUZIONE

Analizzare

Si usano le componenti dell'Equazione 4.9:

$$\vec{r}_f = \vec{r}_i + \vec{v}_i t + \frac{1}{2} \vec{a} t^2 = (x_i + v_{xi} t + \frac{1}{2} a_x t^2) \hat{i} + (y_i + v_{yi} t + \frac{1}{2} a_y t^2) \hat{j}$$

Il vettore posizione ad un istante qualunque t è quindi:

$$\vec{r}_f = [0 + (20)t + \frac{1}{2}(4.0)t^2] \hat{i} + [0 + (-15)t + \frac{1}{2}(0)t^2] \hat{j}$$

$$\vec{r}_f = (20t + 2.0t^2) \hat{i} - 15t \hat{j}$$

Concludere Prendiamo in esame il caso limite in cui i valori di t siano molto grandi.

E SE? Si lasci passare un intervallo di tempo molto lungo e quindi si osservi il moto della particella. Per valori molto grandi del tempo, qual è la descrizione del moto?

Risposta La Figura 4.7 mostra che la traiettoria si incurva verso l'asse x . Non c'è nessuna ragione che suggerisca un cambio di questa tendenza: quello che ci si aspetta è che, all'aumentare del tempo, la curva diventi sempre più "parallela" all'asse x . L'equazione (1) è la prova di questa tendenza: infatti la componente x della velocità cresce linearmente nel tempo, mentre la componente y rimane sempre la stessa per cui, a tempi molto grandi, la velocità diventa via via più parallela all'asse x . È chiaro che sia x_f che y_f aumentano con l'aumentare del tempo, ma la componente x_f cresce più rapidamente.

PREVENIRE L'ERRORE 4.2

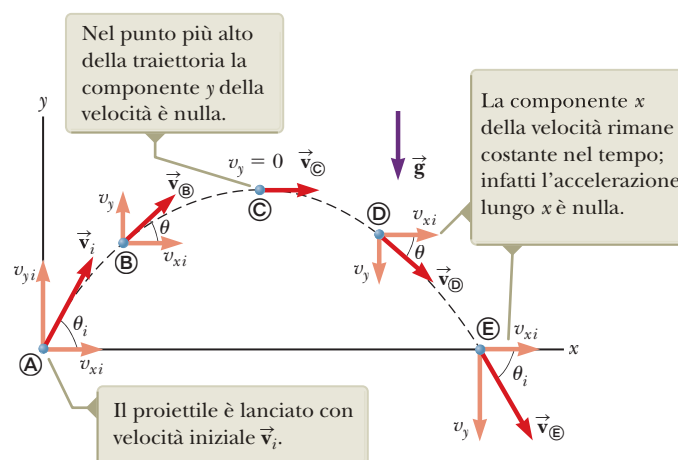
Accelerazione nel punto più in alto

In Prevenire l'errore 2.8 abbiamo già accennato al fatto che molti sostengono che nel punto più alto della traiettoria l'accelerazione dei proiettili è nulla. Questo errore nasce dal confondere la velocità verticale, che è zero in quel punto, con l'accelerazione. Se questa in quel punto fosse nulla, la velocità del corpo non cambierebbe, per cui il corpo continuerebbe a muoversi in orizzontale con un moto rettilineo uniforme! Questo non succede proprio perché l'accelerazione è diversa da zero in tutti i punti della traiettoria.

Figura 4.8 Traiettoria parabolica di un proiettile che parte dall'origine con velocità \vec{v}_i . Il vettore velocità \vec{v} cambia nel tempo sia in modulo che in direzione. Questa variazione è dovuta all'accelerazione di gravità $\vec{a} = \vec{g}$ che è orientata nella direzione negativa dell'asse y .

4.3 Moto dei proiettili

Il moto di una palla da baseball è un esempio di come si muovono i proiettili. La palla ritorna verso terra percorrendo una traiettoria curvilinea. **Il moto dei proiettili** può essere analizzato molto semplicemente sulla base di due ipotesi: (1) l'accelerazione di caduta libera si mantiene costante per tutto il moto ed è diretta verso il basso¹ (Es: $a_x = 0$, $a_y = -g$) e (2) l'effetto della resistenza dell'aria è trascurabile². Mostreremo che, sotto queste ipotesi, la *traiettoria* del proiettile è *sempre* una parabola come mostrato in Figura 4.7. **Adopereremo queste ipotesi semplificatrici in tutto questo capitolo.**



¹Questa ipotesi è valida fino a quando la gittata è piccola rispetto al raggio della Terra (6.4×10^6 m). In sostanza, questa ipotesi è equivalente a considerare la Terra piatta su tutta la gittata del moto.

²In generale questa ipotesi è non vera, in particolare a velocità elevate. In aggiunta, ogni rotazione impartita al proiettile, come quella impartita dal lanciatore a una palla ovale, può produrre fenomeni molto interessanti dovuti alle forze aerodinamiche, che discuteremo nel Capitolo 14.

L'espressione del vettore posizione del proiettile in funzione del tempo segue immediatamente dall'Equazione 4.9 con $\vec{a} = \vec{g}$, che è l'accelerazione di gravità.

$$\vec{r}_f = \vec{r}_i + \vec{v}_i t + \frac{1}{2} \vec{g} t^2 \quad (4.10)$$

dove le componenti x e y della velocità iniziale del proiettile sono:

$$v_{xi} = v_i \cos \theta_i \quad v_{yi} = v_i \sin \theta_i \quad (4.11)$$

L'espressione contenuta nell'Equazione 4.10 è disegnata nella Figura 4.9 e si riferisce ad un proiettile che parte dall'origine, così che $\vec{r}_i = 0$. È interessante notare che la posizione finale del proiettile è la sovrapposizione del termine \vec{r}_i , posizione iniziale, del termine $\vec{v}_i t$, che sarebbe lo spostamento se non ci fosse l'accelerazione, e del termine $\frac{1}{2} \vec{g} t^2$, dovuto all'accelerazione di gravità. In altre parole, se non ci fosse l'accelerazione di gravità, il punto materiale continuerebbe a muoversi di moto rettilineo nella direzione di \vec{v}_i . Quindi la distanza verticale $\frac{1}{2} g t^2$, di cui il punto materiale "cade giù" dal suo percorso rettilineo, è esattamente uguale alla distanza che un corpo, lasciato cadere a partire dalla quiete, percorrerebbe nello stesso intervallo di tempo lungo la verticale.

Nel Paragrafo 4.2 abbiamo visto che un moto in due dimensioni con accelerazione costante può essere descritto come la combinazione di due moti indipendenti con accelerazioni a_x e a_y . Il moto del proiettile può essere trattato come un moto con accelerazione $a_x = 0$ nella direzione di x , e con accelerazione costante $a_y = -g$ nella direzione di y . Riassumendo, il modello di analisi del moto di un proiettile è la sovrapposizione di due modelli di analisi: (1) un punto materiale con velocità costante in direzione orizzontale (Eq. 2.7),

$$x_f = x_i + v_{xi} t \quad (4.12)$$

e (2) un punto materiale con accelerazione costante in direzione verticale (Eq. 2.13–2.17 con y al posto di x e $a_y = -g$).

$$v_{yf} = v_{yi} - g t \quad (4.13)$$

$$v_{y,media} = \frac{v_{yi} + v_{yf}}{2} \quad (4.14)$$

$$y_f = y_i + \frac{1}{2} (v_{yi} + v_{yf}) t \quad (4.15)$$

$$y_f = y_i + v_{yi} t - \frac{1}{2} g t^2 \quad (4.16)$$

$$v_{yf}^2 = v_{yi}^2 - 2g(y_f - y_i) \quad (4.17)$$

Le componenti orizzontale e verticale del moto di un proiettile sono completamente indipendenti l'una dall'altra e possono essere trattate separatamente; è beninteso che il tempo t è la variabile a comune fra le due componenti.

- QUIZ 4.2** (i) Nella traiettoria parabolica di un proiettile, che è stato lanciato inizialmente verso l'alto come in Figura 4.9, esiste un punto in cui velocità e accelerazione del proiettile sono perpendicolari fra loro? (a) non esiste (b) è il punto più alto (c) è il punto di lancio (ii) Scegliendo ancora fra (a), (b) e (c) esiste un punto in cui i vettori velocità e accelerazione sono paralleli?

Gittata orizzontale ed altezza massima raggiunta da un proiettile

Prima di cominciare con alcuni esempi, consideriamo un caso speciale piuttosto frequente del moto di un proiettile. Supponiamo che un proiettile venga lanciato dall'origine a $t_i = 0$ con una componente v_{yi} positiva, e che alla fine ritorni allo stesso *livello orizzontale* come in Figura 4.10. Questa è una situazione molto comune negli sport come il baseball, il calcio e il golf, in cui la palla ricade alla stessa quota da cui viene lanciata.

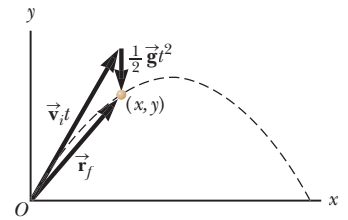


Figura 4.9 Il vettore posizione \vec{r}_f di un proiettile che lascia l'origine con velocità \vec{v}_i . Il vettore $\vec{v}_i t$ sarebbe lo spostamento del proiettile se la gravità fosse assente e il vettore $\frac{1}{2} \vec{g} t^2$ è lo spostamento verticale dalla traiettoria rettilinea che deriva dall'accelerazione gravitazionale orientata verso il basso.

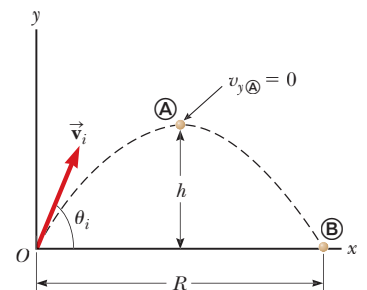


Figura 4.10 Un proiettile, lanciato dall'origine a $t_i = 0$ con velocità iniziale \vec{v}_i , vola sopra una superficie in piano. La massima altezza raggiunta dal proiettile è h e la gittata è R . Il punto A, il più alto raggiunto dal proiettile, ha coordinate $(R/2, h)$.

Vi sono due punti speciali che sono interessanti da analizzare: il picco ④ di coordinate cartesiane $(R/2, h)$ ed il punto ⑤ di coordinate $(R, 0)$. La distanza R è detta *gittata* del proiettile ed h è l'*altezza massima* raggiunta dal proiettile. Determiniamo h ed R in termini di v_i , θ_i e g .

Possiamo determinare l'altezza massima, h , raggiunta dal proiettile notando che, nel picco, $v_{y④} = 0$. Pertanto, dal modello punto materiale con accelerazione costante possiamo utilizzare la componente y dell'Equazione 2.13 per determinare il tempo $t_{④}$ che il proiettile impiega per raggiungere l'altezza massima:

$$v_{yf} = v_{yi} - gt \rightarrow 0 = v_i \sin \theta_i - gt_{④}$$

$$t_{④} = \frac{v_i \sin \theta_i}{g} \quad (4.18)$$

Sostituendo questa espressione per $t_{④}$ nella componente y dell'Equazione 2.16 e sostituendo $y_f = y_{④}$ con h , otteniamo un'espressione per h in termini del modulo e della direzione del vettore velocità iniziale:

$$y_f = y_i + v_{yi}t - \frac{1}{2}gt^2 \rightarrow h = (v_i \sin \theta_i) \frac{v_i \sin \theta_i}{g} - \frac{1}{2}g \left(\frac{v_i \sin \theta_i}{g} \right)^2$$

$$h = \frac{v_i^2 \sin^2 \theta_i}{2g} \quad (4.19)$$

La gittata R è la distanza orizzontale percorsa dal proiettile in un tempo doppio di quello necessario a raggiungere l'altezza massima, cioè in un tempo $t_{⑤} = 2t_{④}$. Usando il modello punto materiale con velocità costante, e notando che $v_{xi} = v_{x⑤} = v_i \cos \theta_i$ e ponendo $x_{⑤} = R$ per $t = 2t_{④}$, troviamo che:

$$x_f = x_i + v_{xi}t \rightarrow R = v_{xi}t_{⑤} = (v_i \cos \theta_i)2t_{④}$$

$$= (v_i \cos \theta_i) \frac{2v_i \sin \theta_i}{g} = \frac{2v_i^2 \sin \theta_i \cos \theta_i}{g}$$

Poiché $\sin 2\theta = 2 \sin \theta \cos \theta$ (vedi Appendice B.4), R può essere scritta nella forma più compatta

$$R = \frac{v_i^2 \sin 2\theta_i}{g} \quad (4.20)$$

Dall'Equazione 4.20 si ricava il massimo valore di R : $R_{\max} = v_i^2/g$. Questo risultato segue dal fatto che il massimo valore di $\sin 2\theta_i$ è uno, che si ottiene per $2\theta_i = 90^\circ$. Quindi R è massima quando $\theta_i = 45^\circ$.

La Figura 4.11 illustra varie traiettorie per un proiettile con velocità iniziale di modulo sempre uguale, ma lanciato a vari angoli. Come si può vedere, la gittata è massima per $\theta_i = 45^\circ$. Inoltre, per ogni θ_i diverso da 45° , un punto di coordinate $(R, 0)$ può essere raggiunto con due valori complementari di θ_i , come per esempio 75° e 15° . Naturalmente, le altezze massime e i tempi di volo per questi due

PREVENIRE L'ERRORE 4.3

Le Equazioni per la gittata

L'Equazione 4.13 è utile per calcolare R solamente nel caso di traiettorie simmetriche come quelle mostrate in Figura 4.10. Si faccia attenzione a *non usarla* quando la traiettoria non è simmetrica. Il modello punto materiale con velocità costante e quello con accelerazione costante costituiscono il risultato più importante, in quanto danno le componenti della velocità e della posizione in *ogni* istante di un corpo *qualunque* che si muova in due dimensioni con accelerazione costante.

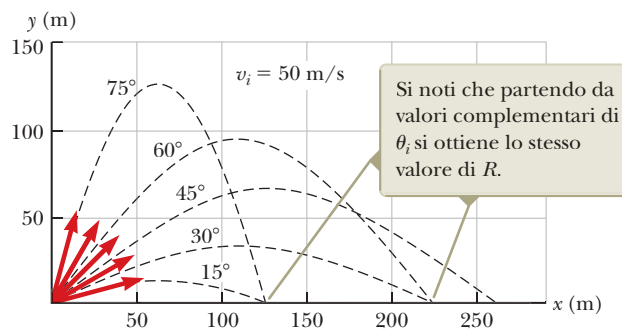


Figura 4.11 Un proiettile sparato al di sopra di una superficie orizzontale piana e che lascia l'origine con velocità iniziale di 50 m/s a vari angoli di lancio.

valori complementari di θ_i saranno differenti. Il tempo di volo sarà dipendente solamente da v_{yi} e indipendente da v_{xi} .

- QUIZ 4.3** Si classifichino le cinque traiettorie della Figura 4.11 tenendo conto dei tempi di volo di ciascuna. Si elenchi per prima quella cui corrisponde il tempo di volo più breve e si continui in ordine crescente.

STRATEGIA PER LA RISOLUZIONE DEI PROBLEMI Moto dei proiettili

Suggerimenti utili per affrontare problemi sul moto dei proiettili:

- 1. Concettualizzare.** Domandarsi cosa succede nel problema fisico reale. Costruirsi la rappresentazione mentale immaginandosi il moto del proiettile lungo la sua traiettoria.
- 2. Classificare.** Assicurarsi che effettivamente si rientri in un caso di caduta libera e che la resistenza dell'aria possa essere trascurata. Si scelga un sistema di coordinate con l'asse x orizzontale e l'asse y verso l'alto. Si usi il modello di punto materiale con velocità costante per la componente x del moto; si usi il modello punto materiale con accelerazione costante per la componente y . Nel caso particolare di un proiettile che ricade alla stessa quota da cui è stato lanciato, si usino le equazioni 4.19 e 4.20.
- 3. Analizzare.** Se il vettore velocità iniziale è noto, se ne ricavano le componenti x e y . Si utilizzino le appropriate equazioni (4.13-4.17) del modello punto materiale con accelerazione costante per il moto verticale, insieme all'Equazione 4.12 per il moto orizzontale, per ricavare i valori incogniti.
- 4. Concludere.** Una volta ottenuto il risultato, si controlli che le risposte non siano in disaccordo con la rappresentazione mentale e visiva del problema fisico. Ci si assicuri anche che i risultati siano realistici.

Esempio 4.2 Salto in lungo

Un saltatore in lungo (Fig. 4.12) si stacca dal suolo con un angolo di 20.0° dall'orizzontale e con una velocità di 11.0 m/s .

(A) Quale sarà la lunghezza del salto?

SOLUZIONE

Concettualizzare Gambe e braccia del saltatore si muovono in maniera molto complicata. Trascurando questi movimenti, si concettualizza il problema come equivalente al moto di un proiettile.

Classificare Si classifica questo esempio fra i problemi di moto di proiettili. Essendo noti sia l'angolo iniziale che il valore della velocità iniziale e sapendo che la quota di arrivo coincide con la quota di partenza, è possibile classificarlo ulteriormente includendolo fra quei casi a cui applicare le Equazioni 4.19 e 4.20. Questa strategia è la più diretta e rapida, anche se i metodi generali darebbero comunque la risposta giusta.

Analizzare

Per trovare la lunghezza del salto, si può allora usare l'Equazione 4.20 della gittata:

$$R = \frac{v_i^2 \sin 2\theta_i}{g} = \frac{(11.0 \text{ m/s})^2 \sin 2(20.0^\circ)}{9.80 \text{ m/s}^2} = 7.94 \text{ m}$$

(B) Qual è la massima altezza che viene raggiunta durante il salto?

SOLUZIONE

Analizzare Si trova la massima altezza raggiunta utilizzando l'Equazione 4.19:

$$h = \frac{v_i^2 \sin^2 \theta_i}{2g} = \frac{(11.0 \text{ m/s})^2 (\sin 20.0^\circ)^2}{2(9.80 \text{ m/s}^2)} = 0.722 \text{ m}$$

Concludere Si trovino le risposte ad (A) e (B) usando il metodo generale. I risultati devono essere gli stessi. Trattare il saltatore come un punto materiale è una semplificazione molto rozza. Ciononostante i risultati ricavati sono molto simili a quelli realizzati dagli atleti. La schematizzazione di un sistema complicato, come il nostro saltatore assimilato ad una particella, può spesso portare a risultati più che ragionevoli.



Figura 4.12 Esempio 4.2. Ashton Eaton gareggia nel salto in lungo di decathlon nel 2016 ai giochi olimpici di Rio de Janeiro per gli Stati Uniti.

Esempio 4.3 Si fa sempre centro

Un proiettile viene lanciato contro il bersaglio nello stesso istante in cui il bersaglio viene lasciato cadere. Si dimostri che, se inizialmente il cannoncino è puntato proprio sul bersaglio e se il bersaglio viene lasciato cadere con velocità iniziale nulla, il proiettile colpirà il bersaglio.

SOLUZIONE

Concettualizzare Lo studio della Fig. 4.13a permette di concettualizzare il problema. Intanto si noti che il problema non chiede una risposta numerica. Ciò vuol dire che il risultato dovrà essere espresso in una qualche forma algebrica.

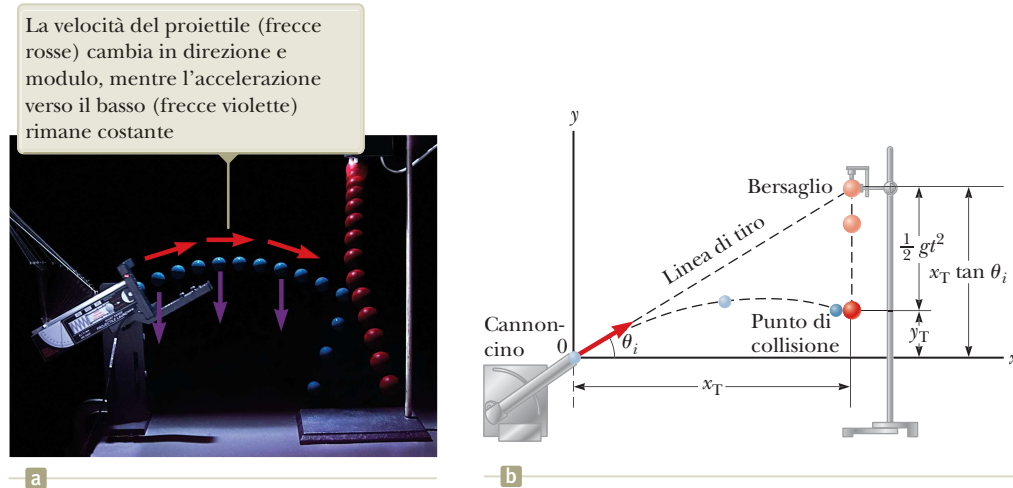


Figura 4.13 (Esempio 4.3) (a) Presentazione a fotografie multiple dell'esperimento dimostrativo proiettile-bersaglio. Se il cannoncino punta sul bersaglio e fa fuoco nello stesso istante in cui il bersaglio comincia a cadere, il proiettile colpirà il bersaglio. (b) Diagramma schematico dell'esperimento.

Classificare Entrambi i corpi sono soggetti solo alla gravità. La classificazione è quella di un problema che tratta due corpi in caduta libera e in cui il moto del bersaglio si svolge in una sola dimensione mentre il moto del proiettile è bidimensionale. Il bersaglio T può essere schematizzato come un *punto materiale con accelerazione costante* in una sola dimensione. Il modello per il proiettile P è invece quello di un *punto materiale con accelerazione costante* in direzione y e un *punto materiale con velocità costante* in direzione x.

Analizzare La Figura 4.13b mostra che la coordinata y del bersaglio y_{iT} è inizialmente $x_T \tan \theta_i$ e che la sua velocità è zero. Cade con accelerazione $a_y = -g$.

Si scrive l'espressione della coordinata y del bersaglio in un istante di tempo qualunque, tenendo conto che la velocità iniziale è nulla:

$$(1) \quad y_T = y_{iT} + (0)t - \frac{1}{2}gt^2 = x_T \tan \theta_i - \frac{1}{2}gt^2$$

Si scrive l'espressione della coordinata y del proiettile in ogni istante di tempo.

$$(2) \quad y_P = y_{iP} + v_{yiP}t - \frac{1}{2}gt^2 = 0 + (v_{iP} \sin \theta_i)t - \frac{1}{2}gt^2 = (v_{iP} \sin \theta_i)t - \frac{1}{2}gt^2$$

Si scrive l'espressione della coordinata x del proiettile in ogni istante di tempo:

$$x_P = x_{iP} + v_{xiP}t = 0 + (v_{iP} \cos \theta_i)t = (v_{iP} \cos \theta_i)t$$

Da questa espressione si ricava il tempo in funzione della posizione orizzontale del proiettile:

$$t = \frac{x_P}{v_{iP} \cos \theta_i}$$

Si sostituisce questa espressione nell'Equazione (2):

$$(3) \quad y_P = (v_{iP} \sin \theta_i) \left(\frac{x_P}{v_{iP} \cos \theta_i} \right) - \frac{1}{2}gt^2 = x_P \tan \theta_i - \frac{1}{2}gt^2$$

Concludere Si confronti la (1) con la (3). Si vede che quando le coordinate x del proiettile e del bersaglio sono uguali – cioè quando $x_T = x_P$ – anche le coordinate y espresse dalla (1) e dalla (3) sono uguali. Il proiettile colpisce quindi il bersaglio.

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**.

