

Comprende



versione Ebook
e Software di simulazione

Fondamenti di Fisica

di Serway-Jewett

VI Edizione

adattamento a cura di

Roberto Bellotti
Vittorio Cataudella

Maurizio Acciarri

Carlo Altucci

Pia Astone

Antonio Bartolotta

Gastone Castellani

Marco De Spirito

Antonio Emanuele

Angelo Galante

Paola Scampoli

Roberto Stroili

Cristiano Viappiani



Accedi all'ebook e ai contenuti digitali

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



Utilizza il codice personale contenuto nel riquadro per registrarti al sito **edisesuniversita.it** e attivare 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 **edisesuniversita.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 o autenticati tramite facebook
- attendi l'email di conferma per perfezionare la registrazione
- torna sul sito **edisesuniversita.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.

- **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**.

Fondamenti di Fisica

di
Serway-Jewett
Sesta edizione

Adattamento di
Roberto Bellotti
Vittorio Cataudella
Maurizio Acciarri
Carlo Altucci
Pia Astone
Antonio Bartolotta
Gastone Castellani
Marco De Spirito
Antonio Emanuele
Angelo Galante
Paola Scampoli
Roberto Stroili
Cristiano Viappiani



Titolo originale:

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

Fondamenti di Fisica di Serway-Jewett - VI edizione
Copyright © 2022, EdiSES Edizioni - Napoli

9 8 7 6 5 4 3 2 1 0
2026 2025 2024 2023 2022

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

TPM S.a.s. di Tavernelli Roberto & C.
Via Biturgense, 104 - Città di Castello (PG)

Stampato presso la

Tipografia Petruzzi S.r.l.
Via Venturelli, 7/B - Città di Castello (PG)

per conto della

EdiSES Edizioni - Piazza Dante, 89 - Napoli

www.edisesuniversita.it
assistenza.edises.it

ISBN 978 88 3623 073 0

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. Saranno grati ai lettori che vorranno inviarci le loro segnalazioni e/o suggerimenti migliorativi sulla piattaforma assistenza.edises.it

Indice generale

CAPITOLO 1

Introduzione e vettori

1.1	Campioni di lunghezza, massa e tempo	1
	<i>Lunghezza</i>	2
	<i>Massa</i>	2
	<i>Tempo</i>	2
	<i>Valori approssimati di lunghezza, massa e tempo</i>	2
1.2	Analisi dimensionale.....	4
1.3	Conversione delle unità.....	5
1.4	Calcoli di ordini di grandezza	6
1.5	Cifre significative.....	7
1.6	Sistemi di coordinate	9
1.7	Vettori e scalari.....	10
1.8	Alcune proprietà dei vettori.....	12
	<i>Uguaglianza di due vettori</i>	12
	<i>Somma di vettori</i>	12
	<i>Opposto di un vettore</i>	13
	<i>Sottrazione di vettori</i>	13
	<i>Moltiplicazione di un vettore per uno scalare</i>	13
	<i>Moltiplicazione di due vettori</i>	13
1.9	Componenti di un vettore e versori.....	14
	<i>Versori</i>	15
	Riepilogo	19
	Quesiti.....	20
	Domande concettuali	20
	Problemi	21
	Ulteriori approfondimenti in e-book	20
E1.1	Invito alla fisica	
E1.2	Modellistica, rappresentazioni alternative e strategia per la risoluzione dei problemi	
	Problemi di approfondimento	
Contesto E1	- Veicoli con combustibili alternativi	

CAPITOLO 2

Moto in una dimensione

2.1	Velocità media.....	25
2.2	Velocità istantanea	29
2.3	Particella con velocità costante	32
2.4	Accelerazione	34
2.5	Particella con accelerazione costante.....	37
2.6	Corpi in caduta libera	41
	Riepilogo	44

Modelli per la risoluzione dei problemi	45
Quesiti.....	45
Domande concettuali	46
Problemi	47

Ulteriori approfondimenti in e-book	20	
E2.1	Strategie per la risoluzione di problemi e identificazione di modelli	
	<i>Particella con velocità costante</i>	
	<i>Diagrammi del moto</i>	
E2.2	Collegamento al contesto: accelerazione richiesta dai consumatori	
	Problemi di approfondimento	

CAPITOLO 3

Moto in due dimensioni

3.1	Vettori di posizione, velocità e accelerazione....	49
3.2	Moto in due dimensioni con accelerazione costante.....	51
3.3	Moto del proiettile	54
	<i>Gittata e altezza massima di un proiettile</i>	56
3.4	Particella in moto circolare uniforme.....	60
3.5	Accelerazione tangenziale e radiale.....	63
	Riepilogo	64
	Modelli per la risoluzione dei problemi.....	64
	Quesiti.....	65
	Domande concettuali	66
	Problemi	66

Ulteriori approfondimenti in e-book	20	
E3.1	Collegamento al contesto: accelerazione laterale delle automobili	
E3.2	Velocità relativa e accelerazione relativa	
	Quesiti di approfondimento	
	Problemi di approfondimento	

CAPITOLO 4

Le leggi del moto

4.1	Il concetto di forza	69
4.2	La prima legge di Newton	71
4.3	Massa.....	72
4.4	La seconda legge di Newton.....	73
	<i>Unità di forza</i>	74
4.5	La forza gravitazionale e il peso	75
4.6	La terza legge di Newton	76

4.7	Applicazioni delle leggi di Newton	78
	<i>Particella in equilibrio</i>	78
	<i>Particella soggetta ad una forza risultante</i>	79
	Riepilogo	84
	Modelli per la risoluzione dei problemi.....	84
	Quesiti.....	85
	Domande concettuali	85
	Problemi	87

Ulteriori approfondimenti in e-book 

E4.1	Collegamento al contesto: forze su automobili
	Problemi di approfondimento

CAPITOLO 5

Altre applicazioni delle leggi di Newton

5.1	Forze di attrito.....	89
5.2	Particella in moto circolare uniforme	93
5.3	Particella in moto circolare non uniforme.....	98
5.4	Moto in presenza di forze d'attrito dipendenti dalla velocità.....	100
	<i>Modello 1: forza d'attrito proporzionale alla velocità dell'oggetto</i>	100
	<i>Modello 2: forza d'attrito proporzionale al quadrato della velocità dell'oggetto</i>	102
	Riepilogo	104
	Modelli per la risoluzione dei problemi.....	104
	Quesiti.....	104
	Domande concettuali	105
	Problemi	105

Ulteriori approfondimenti in e-book 

E5.1	Le forze fondamentali della natura
------	------------------------------------

La forza gravitazionale
 La forza elettromagnetica
 La forza forte
 La forza debole
 La visione attuale delle forze fondamentali

E5.2	Collegamento al contesto: coefficienti di resistenza delle automobili
	Quesiti di approfondimento
	Domande concettuali di approfondimento
	Problemi di approfondimento

CAPITOLO 6

Energia di un sistema

6.1	Sistemi e ambienti.....	107
6.2	Lavoro svolto da una forza costante.....	108
6.3	Prodotto scalare di due vettori.....	110
6.4	Lavoro svolto da una forza variabile	112
	<i>Lavoro svolto da una molla</i>	114

6.5	Energia cinetica e teorema dell'energia cinetica	117
6.6	Energia potenziale di un sistema	120
	<i>Energia potenziale elastica</i>	123
	<i>Iistogrammi dell'energia</i>	124
6.7	Forze conservative e non conservative.....	125
	<i>Forze conservative</i>	126
	<i>Forze non conservative</i>	126
6.8	Relazione tra forze conservative ed energia potenziale	127
6.9	Energia potenziale per le forze gravitazionale ed elettrica.....	128
6.10	Diagrammi di energia ed equilibrio di un sistema	131
	Riepilogo	133
	Quesiti.....	134
	Domande concettuali	135
	Problemi	135

Ulteriori approfondimenti in e-book 

E6.1	Collegamento al contesto: energia potenziale nei carburanti
	<i>Etanolo</i>
	<i>Biodiesel</i>
	<i>Gas naturale</i>
	<i>Propano</i>
	<i>Veicoli elettrici</i>
	Problemi di approfondimento

CAPITOLO 7

Conservazione dell'energia

7.1	Sistema non isolato (energia)	139
7.2	Sistema isolato (energia)	142
7.3	Situazioni con attrito dinamico.....	148
7.4	Variazioni di energia meccanica dovute a forze non conservative	153
7.5	Potenza	157
	Riepilogo	159
	Modelli per la risoluzione dei problemi	159
	Quesiti.....	160
	Domande concettuali	160
	Problemi	161

Ulteriori approfondimenti in e-book 

E7.1	Sistema non isolato nello stato stazionario (energia)
E7.2	Collegamento al contesto: valutazione della potenza delle automobili
	Problemi di approfondimento

Contesto E1 Conclusioni - Possibilità presenti e future

Contesto E2 - Missione su Marte

CAPITOLO 8**Quantità di moto e urti**

8.1	Quantità di moto.....	163
8.2	Sistema isolato (quantità di moto)	166
8.3	Sistema non isolato (quantità di moto).....	168
8.4	Urti in una dimensione	172
	<i>Urti perfettamente anelastici</i>	173
	<i>Urti elastici</i>	173
8.5	Centro di massa.....	178
8.6	Moto di un sistema di particelle.....	182
	Riepilogo	185
	Modelli per la risoluzione dei problemi.....	185
	Quesiti.....	186
	Domande concettuali	187
	Problemi	188
	Ulteriori approfondimenti in e-book	189
E8.1	Urti in due dimensioni	
E8.2	Collegamento al contesto: propulsione di un razzo	
	Problemi di approfondimento	

CAPITOLO 9**Moto rotazionale**

9.1	Posizione, velocità e accelerazione angolari	191
9.2	Corpo rigido soggetto ad accelerazione angolare costante	194
9.3	Relazioni fra grandezze rotazionali e traslazionali.....	195
9.4	Energia cinetica rotazionale.....	196
9.5	Momento di una forza e prodotto vettoriale....	201
9.6	Corpo rigido in equilibrio	205
9.7	Corpo rigido sottoposto a momento risultante delle forze	208
9.8	Considerazioni energetiche nel moto rotazionale	211
9.9	Momento angolare nei sistemi non isolati	213
9.10	Momento angolare nei sistemi isolati	217
9.11	Rotolamento dei corpi rigidi.....	220
	Riepilogo	223
	Modelli per la risoluzione dei problemi.....	224
	Quesiti.....	225
	Domande concettuali	226
	Problemi	226
	Ulteriori approfondimenti in e-book	227

E9.1	Moto di precessione dei giroscopi	
E9.2	Esempio astrofisico di conservazione del momento angolare	
E9.3	Collegamento al contesto: ruotare l'astronave	
	Quesiti di approfondimento	
	Domande concettuali di approfondimento	
	Problemi di approfondimento	

CAPITOLO 10**La gravità, le orbite planetarie e l'atomo di idrogeno**

10.1	Rivisitazione della legge di Newton della gravitazione universale	229
	<i>Il campo gravitazionale</i>	230
10.2	Modelli della gravitazione universale	232
10.3	Le leggi di Keplero.....	232
	<i>La prima legge di Keplero</i>	233
	<i>La seconda legge di Keplero</i>	234
	<i>La terza legge di Keplero</i>	235
10.4	Considerazioni energetiche sul moto dei pianeti e dei satelliti	237
	<i>Velocità di fuga</i>	240
10.5	Spettri atomici e teoria di Bohr dell'atomo di idrogeno	241
	Riepilogo	248
	Quesiti.....	249
	Domande concettuali	250
	Problemi	250

	Ulteriori approfondimenti in e-book	251
--	---	-----

E10.1	Collegamento al contesto: passare da un'orbita circolare ad una ellittica	
-------	---	--

E10.2	Buchi neri	
	Problemi di approfondimento	

	Contesto E2 Conclusioni - Pianificazione di una missione di successo	
--	--	--

	Contesto E3 - Terremoti	
--	-------------------------	--

CAPITOLO 11**Moto oscillatorio**

11.1	Moto di un corpo collegato a una molla	253
11.2	Particella in moto armonico semplice	255
11.3	Energia di un oscillatore armonico semplice...	260
11.4	Il pendolo semplice	262
11.5	Il pendolo fisico	264
11.6	Oscillazioni smorzate	266
11.7	Oscillazioni forzate	267
	Riepilogo	268
	Modelli per la risoluzione dei problemi.....	269
	Quesiti.....	269
	Domande concettuali	270
	Problemi	271

	Ulteriori approfondimenti in e-book	272
--	---	-----

E11.1	Collegamento al contesto: risonanza nelle strutture	
	Problemi di approfondimento	

CAPITOLO 12

Onde meccaniche. Sovrapposizione e onde stazionarie

12.1	Propagazione di una perturbazione.....	274
12.2	Modello sinusoidale di un'onda che si propaga.....	275
	Funzioni d'onda rispetto al tempo.....	279
12.3	La velocità delle onde trasversali nelle corde ..	280
12.4	Riflessione e trasmissione delle onde ..	281
12.5	Potenza trasmessa dalle onde sinusoidali nelle corde.....	282
12.6	Onde acustiche	285
12.7	L'effetto Doppler	286
	Sonografia Doppler BIO	288
12.8	Interferenza tra onde	289
	Sovrapposizione di onde sinusoidali	290
	Interferenza di onde sonore.....	292
12.9	Onde stazionarie	293
12.10	Onde sottoposte a condizioni al contorno.....	296
12.11	Battimenti: interferenza temporale	298
12.12	L'orecchio umano BIO	300
	Riepilogo	301
	Modelli per la risoluzione dei problemi.....	302
	Quesiti.....	302
	Domande concettuali	304
	Problemi	305
	Ulteriori approfondimenti in e-book	⌚
E12.1	Equazione d'onda lineare	
E12.2	L'onda sonora come onda di spostamento e come onda di pressione	
E12.3	Collegamento al contesto: le onde sismiche	
E12.4	Onde stazionarie nelle colonne d'aria	
E12.5	Configurazioni d'onda non sinusoidali	
E12.6	Teorie sulla percezione del tono	
E12.7	Collegamento al contesto: costruzione sui ventri	
	Quesiti di approfondimento	
	Domande concettuali di approfondimento	
	Problemi di approfondimento	
Contesto E3	Conclusioni - Minimizzare il rischio	
Contesto E4	- Attacchi di cuore	

CAPITOLO 13

Meccanica dei fluidi

13.1	Pressione.....	309
13.2	Variazione della pressione con la profondità...	311
13.3	Misure di pressione	313
13.4	Forze di galleggiamento e principio di Archimede	314

Caso I: oggetto completamente immerso	315
Caso II: corpo galleggiante.....	315

13.5	Dinamica dei fluidi	317
	Caratteristiche del flusso	317
13.6	Linee di corrente ed equazione di continuità dei fluidi	318
13.7	Teorema di Bernoulli.....	320
13.8	Altre applicazioni della dinamica dei fluidi ..	323
	Riepilogo	323
	Quesiti.....	324
	Domande concettuali	325
	Problemi	326

Ulteriori approfondimenti in e-book	⌚
---	---

E13.1	Collegamento al contesto: flusso turbolento del sangue	
	Quesiti di approfondimento	
	Problemi di approfondimento	

Contesto E4 Conclusioni - Individuazione dell'aterosclerosi e prevenzione degli attacchi di cuore BIO	
--	--

Contesto E5 - Il riscaldamento globale	
--	--

CAPITOLO 14

Temperatura e teoria cinetica dei gas

14.1	Temperatura e principio zero della termodinamica	329
14.2	I termometri e le scale di temperatura.....	331
	Il termometro a gas a volume costante e la scala Kelvin.....	332
14.3	Dilatazione termica di solidi e liquidi.....	334
	Il comportamento anomalo dell'acqua.....	336
14.4	Descrizione macroscopica di un gas perfetto ..	337
14.5	La teoria cinetica dei gas	339
	Interpretazione molecolare della pressione di un gas perfetto.....	340
	Interpretazione molecolare della temperatura di un gas perfetto.....	343
14.6	Distribuzione delle velocità molecolari	345
	Riepilogo	348
	Quesiti.....	348
	Domande concettuali	350
	Problemi	350

Ulteriori approfondimenti in e-book	⌚
---	---

E14.1	La scala Fahrenheit	
E14.2	Collegamento al contesto: il gradiente verticale di temperatura dell'atmosfera	
	Problemi di approfondimento	

CAPITOLO 15

Energia nelle trasformazioni termodinamiche: il primo principio della termodinamica

15.1	Calore ed energia interna	353
	Unità di misura del calore.....	354
15.2	Calore specifico.....	355
	Calorimetria.....	356
15.3	Calore latente	357
15.4	Lavoro nelle trasformazioni termodinamiche ..	361
15.5	Il primo principio della termodinamica.....	365
15.6	Alcune applicazioni del primo principio della termodinamica.....	366
15.7	Calori specifici molari dei gas perfetti	370
15.8	Trasformazioni adiabatiche per un gas perfetto	373
15.9	Calori specifici molari ed equipartizione dell'energia.....	375
	Un'indicazione di quantizzazione dell'energia.....	377
15.10	Meccanismi di trasferimento di energia nei processi termici	378
	Conduzione.....	378
	Convezione.....	380
	Radiazione.....	381
	Riepilogo	382
	Quesiti.....	383
	Domande concettuali	383
	Problemi	384

Ulteriori approfondimenti in e-book	⌚	
E15.1	Circolazione d'aria in una spiaggia	
E15.2	Il cucchiaio che si scioglie	
E15.3	Termoregolazione nell'uomo	
E15.4	Collegamento al contesto: rientro energetico per la Terra	
	Quesiti di approfondimento	
	Problemi di approfondimento	

CAPITOLO 16

Macchine termiche, entropia e secondo principio della termodinamica

16.1	Macchine termiche e secondo principio della termodinamica	390
16.2	Trasformazioni reversibili e irreversibili	392
16.3	La macchina di Carnot	392
16.4	Pompe di calore e frigoriferi	395
16.5	Un enunciato alternativo del secondo principio	396
16.6	Entropia	397
16.7	Entropia e secondo principio della termodinamica	399

16.8	Variazioni di entropia nelle trasformazioni irreversibili.....	401
	Variazione di entropia in una espansione libera.....	401
	Riepilogo	403
	Quesiti.....	404
	Domande concettuali	405
	Problemi	405

Ulteriori approfondimenti in e-book	⌚
---	---

E16.1	Esempio fisico di entropia	
E16.2	Secondo principio ed evoluzione	
E16.3	Collegamento al contesto: l'atmosfera come macchina termica	
	Quesiti di approfondimento	
	Domande concettuali di approfondimento	
	Problemi di approfondimento	

Contesto E5 Conclusioni - Stima della temperatura sulla superficie della Terra

Contesto E6 - Fulmini

CAPITOLO 17

Forze elettriche e campi elettrici

17.1	Cenni storici	409
17.2	Proprietà delle cariche elettriche	410
17.3	Isolanti e conduttori	412
	Carica per induzione	412
17.4	La legge di Coulomb	414
17.5	Campi elettrici.....	417
	Campo elettrico generato da una distribuzione continua di carica.....	420
17.6	Linee di campo elettrico	423
17.7	Moto di particelle cariche in un campo elettrico uniforme	425
17.8	Flusso elettrico	427
17.9	Il teorema di Gauss	430
17.10	Applicazioni del teorema di Gauss a distribuzioni simmetriche di cariche	432
17.11	Conduttori in equilibrio elettrostatico	434
	Riepilogo	435
	Quesiti.....	436
	Domande concettuali	437
	Problemi	438

Ulteriori approfondimenti in e-book	⌚
---	---

E17.1	Bilancia di torsione	
E17.2	Collegamento al contesto: il campo elettrico atmosferico	
	Eventi luminosi transienti	
	Problemi di approfondimento	

CAPITOLO 18**Potenziale elettrico e capacità**

18.1	Potenziale elettrico e differenza di potenziale	441
18.2	Differenza di potenziale in un campo elettrico uniforme	443
18.3	Potenziale elettrico ed energia potenziale elettrica di cariche puntiformi	446
18.4	Ricavare il valore del campo elettrico dal potenziale elettrico	449
18.5	Potenziale elettrico dovuto a distribuzioni continue di carica	451
18.6	Potenziale elettrico di un conduttore carico	453
	<i>Cavità all'interno di un conduttore in equilibrio</i>	455
18.7	La capacità.....	455
	<i>Il condensatore piano</i>	456
	<i>Il condensatore cilindrico</i>	458
18.8	Collegamento di condensatori.....	459
	<i>Collegamento in parallelo</i>	459
	<i>Collegamento in serie</i>	460
18.9	Energia immagazzinata in un condensatore carico	463
18.10	Condensatori con dielettrici	465
	Riepilogo	469
	Quesiti.....	470
	Domande concettuali	471
	Problemi	472

Ulteriori approfondimenti in e-book

E18.1	La membrana plasmatica del neurone come condensatore piano
E18.2	Tipi di condensatori
E18.3	Collegamento al contesto: l'atmosfera come condensatore
	Problemi di approfondimento

CAPITOLO 19**Corrente e circuiti a corrente continua**

19.1	La corrente elettrica	475
19.2	Resistenza e legge di Ohm	478
	<i>Variazione della resistività con la temperatura</i>	482
19.3	Superconduttori.....	483
19.4	Un modello per la conduzione elettrica	484
19.5	Energia e potenza nei circuiti elettrici	487
19.6	Sorgenti di f.e.m.....	490
19.7	Resistori in serie e in parallelo	492
19.8	Leggi di Kirchhoff.....	497
19.9	Circuiti <i>RC</i>	499
	<i>Carica di un condensatore</i>	499
	<i>Scarica di un condensatore</i>	502
	Riepilogo	504
	Quesiti.....	505
	Domande concettuali	506
	Problemi	507

Ulteriori approfondimenti in e-book

E19.1	Codice colore dei resistori
E19.2	Attività elettrica del cuore
E19.3	Modello a cavo per la propagazione di un potenziale d'azione lungo un nervo
E19.4	Collegamento al contesto: l'atmosfera come conduttore
	Problemi di approfondimento

Contesto E6 Conclusioni - Determinazione del numero di fulmini che colpiscono la Terra

Contesto E7 - Magnetismo in medicina

CAPITOLO 20**Forze e campi magnetici**

20.1	Introduzione storica	509
20.2	Il campo magnetico	510
20.3	Moto di una particella carica in un campo magnetico uniforme	513
20.4	Applicazioni del moto di particelle cariche in un campo magnetico	516
	<i>Selettore di velocità</i>	517
	<i>Lo spettrometro di massa</i>	517
20.5	Forza magnetica su un conduttore percorso da corrente	518
20.6	Momento delle forze agenti su una spira in un campo magnetico uniforme	520
20.7	La legge di Biot-Savart	523
20.8	Forza magnetica fra due conduttori paralleli ..	526
20.9	Teorema di Ampère	528
20.10	Campo magnetico di un solenoide	531
20.11	Magnetismo nella materia	533
	<i>Materiali ferromagnetici</i>	533
	Riepilogo	535
	Quesiti.....	535
	Domande concettuali	537
	Problemi	537

Ulteriori approfondimenti in e-book

E20.1	Il ciclotrone
E20.2	Collegamento al contesto: navigazione magnetica a distanza per operazioni di ablazione cardiaca con catetere
	Quesiti di approfondimento
	Domande concettuali di approfondimento
	Problemi di approfondimento

CAPITOLO 21**Legge di Faraday e induttanza**

21.1	Legge di Faraday dell'induzione	539
21.2	Forza elettromotrice dinamica	543
	<i>Il generatore a corrente alternata</i>	548

21.3	Legge di Lenz.....	549
21.4	Forze elettromotrici indotte e campi elettrici....	549
21.5	Autoinduzione.....	550
21.6	Circuiti <i>RL</i>	552
21.7	Energia immagazzinata in un campo magnetico	555
	Riepilogo	558
	Quesiti.....	559
	Domande concettuali	560
	Problemi	561
	Ulteriori approfondimenti in e-book	⌚
E21.1	Aspetti energetici della legge di Lenz	
E21.2	Collegamento al contesto: l'uso della stimolazione magnetica transcranica nella depressione BIO	
	Quesiti di approfondimento	
	Domande concettuali di approfondimento	
	Problemi di approfondimento	
	Contesto E7 Conclusioni - Risonanza magnetica nucleare e imaging a risonanza magnetica	
	Contesto E8 - Laser	

	Ulteriori approfondimenti in e-book	⌚
E22.1	Navigazione spaziale a vela	
E22.2	Collegamento al contesto: le particolari proprietà della luce laser	
	<i>Applicazioni</i>	
	Problemi di approfondimento	

CAPITOLO 23

Riflessione e rifrazione della luce e formazione dell'immagine da specchi e lenti

23.1	La natura della luce	597
23.2	Il modello di raggio luminoso in ottica geometrica.....	598
23.3	Riflessione di un'onda	599
23.4	Rifrazione di un'onda.....	602
23.5	Dispersione e prismi	606
23.6	Il principio di Huygens.....	608
23.7	Riflessione interna totale	609
23.8	Immagini formate da specchi piani.....	611
23.9	Immagini formate da specchi sferici.....	614
	<i>Specchi concavi</i>	614
	<i>Specchi convessi.....</i>	616
	<i>Costruzione delle immagini per gli specchi.....</i>	617
23.10	Immagini formate per rifrazione	621
	<i>Superfici piane rifrangenti.....</i>	622
23.11	Lenti sottili	623
	<i>Costruzione delle immagini per le lenti sottili.....</i>	625
	Riepilogo	628
	Modelli per la risoluzione dei problemi	628
	Quesiti.....	629
	Domande concettuali	631
	Problemi	633

	Ulteriori approfondimenti in e-book	⌚
E23.1	Il principio di Huygens applicato alla riflessione e alla rifrazione	
E23.2	Collegamento al contesto: le fibre ottiche	
E23.3	Combinazioni di lenti sottili	
E23.4	L'occhio BIO	
	<i>Condizioni dell'occhio</i>	
E23.5	Collegamento al contesto: alcune applicazioni mediche BIO	
	Problemi di approfondimento	

Contesto E8 Conclusioni - Usare i laser per immagazzinare e leggere informazioni digitali

Contesto E9 - Le implicazioni cosmiche

CAPITOLO 24

Fisica quantistica e atomica

24.1	Radiazione di corpo nero e teoria di Planck....	637
24.2	L'effetto fotoelettrico.....	641

24.3	L'effetto Compton	645
24.4	Fotoni e onde elettromagnetiche	647
24.5	Le proprietà ondulatorie delle particelle.....	648
	<i>L'esperimento di Davisson-Germer</i>	649
	<i>Il microscopio elettronico.....</i>	650
24.6	La particella quantistica.....	650
24.7	L'esperimento della doppia fenditura rivisitato	653
24.8	Il principio di indeterminazione.....	655
24.9	Un'interpretazione della meccanica quantistica	656
24.10	La particella quantistica sottoposta alle condizioni al contorno	658
24.11	L'equazione di Schrödinger	660
24.12	Effetto tunnel attraverso una barriera di potenziale	661
	<i>Applicazioni dell'effetto tunnel</i>	662
24.13	I primi modelli strutturali dell'atomo	663
24.14	L'atomo di idrogeno rivisitato.....	665
24.15	Interpretazione fisica dei numeri quantici.....	667
	<i>Il numero quantico orbitale ℓ</i>	667
	<i>Il numero quantico magnetico orbitale m_ℓ</i>	668
	<i>Il numero quantico magnetico di spin m_s</i>	668
24.16	Il principio di esclusione e la tavola periodica ..	671
24.17	Ancora sugli spettri atomici: visibile e raggi X... ..	677
	<i>Spettri X</i>	678
	<i>Riepilogo</i>	680
	<i>Quesiti.....</i>	682
	<i>Problemi</i>	682
	Ulteriori approfondimenti in e-book	682
E24.1	Condizioni al contorno per l'atomo di idrogeno	
E24.2	Collegamento al contesto: la temperatura cosmica	
E24.3	Esperimento di Stern e Gerlach	
E24.4	Collegamento al contesto: atomi nello spazio	
	Problemi di approfondimento	

CAPITOLO 25

Fisica nucleare e delle particelle

25.1	Alcune proprietà dei nuclei	688
	<i>Carica e massa</i>	688
	<i>La dimensione dei nuclei</i>	689
	<i>Stabilità nucleare.....</i>	690
	<i>Spin nucleare e momento magnetico.....</i>	691
	<i>Risonanza magnetica nucleare e immagini da risonanza magnetica</i>	692
25.2	Energia di legame	693
25.3	Radioattività.....	694
25.4	I processi di decadimento radioattivo	697
	<i>Decadimento alfa.....</i>	698
	<i>Decadimento beta.....</i>	699
	<i>Datazione col carbonio.....</i>	701
	<i>Decadimento gamma</i>	702

25.5	Le forze fondamentali in natura	703
25.6	Positroni e altre antiparticelle.....	704
25.7	I mesoni e l'inizio della fisica delle particelle	706
25.8	Classificazione delle particelle	707
	<i>Adroni</i>	707
	<i>Leptoni</i>	709
25.9	Leggi di conservazione	709
	<i>Numeri barionico</i>	709
	<i>Numeri leptonico</i>	710
25.10	Particelle strane e stranezza	710
25.11	I quark	711
	<i>Il modello originale a quark: un modello per gli adroni</i>	711
	<i>Charm e altri sviluppi</i>	712
25.12	Quark colorati	714
25.13	Il modello standard.....	715
	<i>Riepilogo</i>	716
	<i>Quesiti.....</i>	717
	<i>Problemi</i>	719

Ulteriori approfondimenti in e-book

E25.1	Collegamento al contesto: indagare i sistemi più piccoli per capire i più grandi	
	<i>Evidenza per l'espansione dell'Universo</i>	
	<i>L'Universo si espanderà per sempre?</i>	
	<i>Massa mancante nell'Universo?</i>	
	<i>Energia misteriosa nell'Universo?</i>	
	Problemi di approfondimento	

Contesto E9 Conclusioni - Problemi e prospettive

CAPITOLO E26

Relatività

E26.1	Il principio di relatività galileiana	
E26.2	L'esperimento di Michelson-Morley	
E26.3	Il principio di relatività di Einstein	
E26.4	Conseguenze della relatività ristretta	
	<i>Simultaneità e relatività del tempo</i>	
	<i>Dilatazione del tempo</i>	
	<i>Il paradosso dei gemelli</i>	
	<i>Contrazione della lunghezza</i>	
	<i>Collegamento al contesto: da Marte alle stelle</i>	
E26.5	Le trasformazioni di Lorentz	
	<i>Le trasformazioni di Lorentz per le velocità</i>	
E26.6	Quantità di moto relativistica e forma relativistica delle leggi di Newton	
E26.7	Energia relativistica	
E26.8	Relatività generale	
	<i>Riepilogo</i>	
	<i>Quesiti</i>	
	<i>Domande concettuali</i>	
	<i>Problemi</i>	

APPENDICE A

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

APPENDICE B

Richiami di analisi matematica	A.6
B.1 Notazione scientifica	A.6
B.2 Algebra	A.7
B.3 Geometria	A.12
B.4 Trigonometria	A.13
B.5 Sviluppo in serie	A.15
B.6 Calcolo differenziale	A.16

B.7 Calcolo integrale	A.18
B.8 Propagazione degli errori	A.22

APPENDICE C

Tavola periodica degli elementi	A.24
--	------

APPENDICE D

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

Risposte ai Quiz rapidi e a Problemi scelti	A.27
--	------

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 ed insegnò dal 1967 al 1980. Nel 1977, ricevette il Distinguished Teaching Award dalla Clarkson University e lo Alumni Achievement Award dall'Utica College nel 1985. È stato Guest Scientist allo IBM Research Laboratory a Zurigo, in Svizzera, dove ha lavorato con K. Alex Müller, premio Nobel nel 1987. Il Dr. Serway è stato anche scienziato ospite all'Argonne National Laboratory, dove ha collaborato con il suo maestro ed amico Sam Marshall. È coautore, oltre che delle precedenti edizioni di questo testo, di *College Physics*, nona edizione, *Fisica per Scienze ed Ingegneria*, quinta edizione, *Essentials of College Physics*, *Modern Physics*, terza edizione, e del testo *Physics* per le scuole superiori, pubblicato da Holt McDougal. Il Dr. Serway ha pubblicato più di 40 articoli scientifici nel campo della fisica dei mezzi condensati ed ha svolto più di 60 presentazioni a convegni scientifici. Il Dr. Serway e sua moglie Elizabeth amano viaggiare, giocare a golf e trascorrere il loro tempo libero con i loro quattro figli, dieci nipoti e un pronipote.



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

Curatori

Maurizio Acciari - Università degli Studi di Milano-Bicocca

Carlo Altucci - Università degli Studi di Napoli “Federico II”

Pia Astone - Università degli Studi di Roma “La Sapienza”

Antonio Bartolotta - Università degli Studi di Palermo

Roberto Bellotti - Università degli Studi di Bari

Gastone Castellani - Università degli Studi di Bologna

Vittorio Cataudella - Università degli Studi di Napoli “Federico II”

Marco De Spirito - Università Cattolica del Sacro Cuore

Antonio Emanuele - Università degli Studi di Palermo

Angelo Galante - Università degli Studi dell’Aquila

Paola Scampoli - Università degli Studi di Napoli “Federico II”

Roberto Stroili - Università degli Studi di Padova

Cristiano Viappiani - Università degli Studi di Parma

Coordinamento e revisione

Vittorio Cataudella - Università degli Studi di Napoli “Federico II”

Roberto Bellotti - Università degli Studi di Bari

Si ringrazia per la collaborazione il Dott. Francesco Bajardi - Università degli Studi di Napoli “Federico II”

Prefazione

Fondamenti di Fisica è progettato per i corsi di laurea scientifici e di medicina che prevedono un unico insegnamento dedicato alla Fisica. Questa sesta edizione contiene due novità didattiche: la trattazione della Fisica moderna (che include la Fisica quantistica, la Fisica atomica, la Fisica nucleare e la Fisica delle particelle) e la presenza di materiale didattico aggiuntivo in formato e-book.

Tenendo in considerazione l'attuale organizzazione della didattica universitaria, che prevede prevalentemente l'erogazione di ogni insegnamento concentrata in un semestre, si è proceduto ad uno snellimento sostanziale dei contenuti proposti nella versione cartacea di questa sesta edizione, senza però perdere il rigore e la chiarezza espositiva delle precedenti edizioni del testo. Per questa ragione, molti argomenti sono spostati nella versione e-book del testo: possono essere, quindi, proposti agli studenti in taluni casi come approfondimento degli argomenti già trattati nei capitoli presenti nella versione cartacea, in altri casi come argomenti aggiuntivi.

Gli scopi principali e le linee guida di questo progetto sono:

- ridurre il contenuto del corso, seguendo il tema “meno può essere meglio”;
- inserire in modo naturale la Fisica contemporanea nel corso;
- organizzare il corso nel contesto di uno o più “filoni storici”.

Come risultato di questo progetto, il libro ha le seguenti caratteristiche:

- ha un approccio evolutivo che dovrebbe soddisfare l'attuale richiesta dei docenti dei corsi di Fisica in Italia;
- elimina alcuni argomenti di Fisica classica, come i circuiti in corrente alternata e gli strumenti ottici, e pone minore enfasi sul modello del corpo rigido, sull'ottica e su alcuni aspetti della termodinamica;
- introduce subito nel testo alcuni argomenti della Fisica contemporanea, come le forze fondamentali, la relatività ristretta, la quantizzazione dell'energia e il modello di Bohr dell'atomo di idrogeno;
- cerca di evidenziare il quadro unitario della disciplina della Fisica e la natura globale dei principi fisici;
- evidenzia l'uso della Fisica in altri ambiti, con interessanti riferimenti al settore biomedico, alle scienze sociali, ai fenomeni naturali e ai progressi tecnologici;
- sfrutta l'articolazione tra versione cartacea ed e-book per snellire il testo e fornire più flessibilità all'impostazione didattica del docente.

I risultati della ricerca in didattica della Fisica hanno stimolato l'utilizzo di strumenti quali Quiz rapidi, Domande concettuali, Prevenire le insidie, **E se?** presenti negli esempi guidati, l'uso degli istogrammi energetici, l'approccio modellistico alla risoluzione dei problemi. Si è dato spazio anche all'approccio energetico globale, introdotto nel Capitolo 7.

Obiettivi

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

Organizzazione

Il testo presenta una “sovraposizione contestuale”, che consente interessanti applicazioni del materiale alle reali esigenze. Questa caratteristica è stata sviluppata in modo da renderla flessibile; è una sovrapposizione nel senso che il docente che non volesse seguire l’approccio potrà semplicemente ignorare i contenuti contestuali aggiuntivi senza sacrificare la completa copertura dei contenuti esistenti. È plausibile, tuttavia, che molti studenti trarranno beneficio da questo approccio.

L’organizzazione della sovrapposizione contestuale suddivide il testo in nove Contesti (tutti presenti nella versione e-book), dopo il Capitolo 1, nel modo seguente:

Numero del contesto	Contesto	Argomento di Fisica	Capitoli
E1	Veicoli con combustibili alternativi	Meccanica classica	2-7
E2	Missione su Marte	Meccanica classica	8-10 ed E26
E3	Terremoti	Vibrazioni e onde	11-12
E4	Attacchi di cuore	Fluidi	13
E5	Il riscaldamento globale	Termodinamica	14-16
E6	Fulmini	Elettricità	17-19
E7	Magnetismo in medicina	Magnetismo	20-21
E8	Laser	Ottica	22-23
E9	Le implicazioni cosmiche	Fisica moderna	24-25

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

Caratteristiche del testo

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

Soluzione dei problemi e comprensione dei concetti

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

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

Esempi guidati. Gli esempi guidati sono presentati in un formato a doppia colonna per accettuare i concetti di fisica. La colonna a sinistra mostra le informazioni testuali che

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

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

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

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

ESEMPIO 6.6 Un blocco trascinato su una superficie senza attrito

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

SOLUZIONE

Concettualizzazione La Figura 6.13 illustra la situazione. Immagina di tirare un'automobile giocattolo su un tavolo orizzontale con un elastico orizzontale attaccato alla parte anteriore dell'auto. La forza viene mantenuta costante assicurandosi che l'elastico allungato abbia sempre la stessa lunghezza.

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

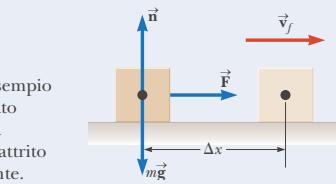
Analisi La forza esterna risultante sul blocco è la forza orizzontale di 12 N. Usando il teorema dell'energia cinetica e notando che l'energia cinetica iniziale è zero, troviamo

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

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

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

Sostituendo i valori numerici:



► **Figura 6.13** (Esempio 6.6) Un blocco tirato verso destra su una superficie priva di attrito da una forza costante.

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

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

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

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

$$W_{\text{est}} = F'\Delta x' = \Delta K = F\Delta x$$

$$\Delta x' = \frac{F}{F'} \Delta x = \frac{F}{2F} \Delta x = \frac{1}{2} \Delta x$$

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

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

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

Quiz rapidi. I quiz sono una opportunità per verificare la comprensione del concetto fisico appena incontrato. Per rispondere ai quiz, gli studenti devono decidere in base a ragionamenti sensati e molti dei quiz sono stati studiati per aiutare gli studenti ad evitare

Altre applicazioni delle leggi di Newton

Chris Graythen/Getty Images



Sommario

Nel Capitolo 4 abbiamo introdotto le leggi del moto di Newton e le abbiamo applicate a casi in cui era possibile trascurare le forze di attrito. In questo capitolo, estenderemo la nostra indagine ai sistemi che si muovono in presenza di forze di attrito, che ci consentiranno di creare modelli più realistici. Questi sistemi comprendono oggetti che si muovono su superfici scabre e oggetti che si muovono in mezzi viscosi, come i liquidi e l'aria. Applicheremo le leggi di Newton anche alla dinamica del moto circolare, in modo da comprendere meglio il moto di oggetti che si muovono lungo traiettorie circolari sotto l'azione di vari tipi di forze.

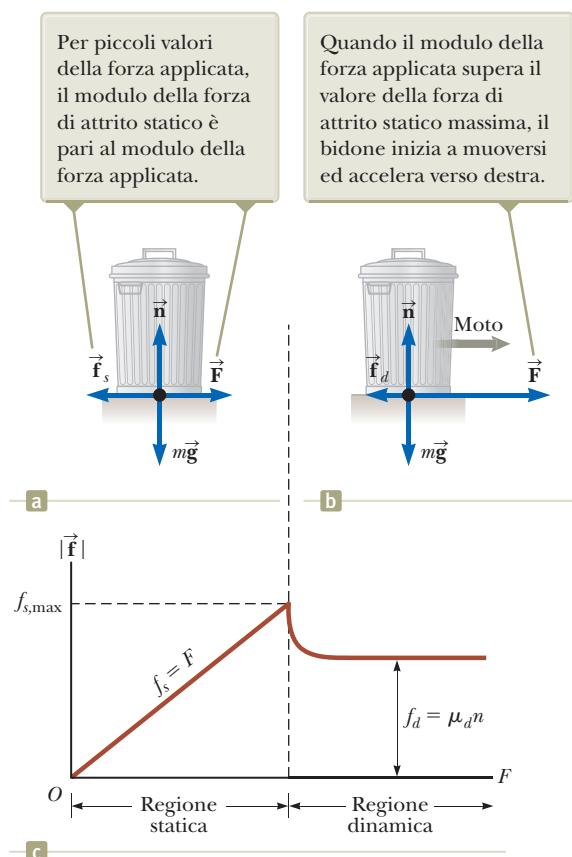
Ulteriori approfondimenti in e-book: Paragrafo E5.1 Le forze fondamentali della natura.

5.1 | Forze di attrito

Quando un corpo è in movimento su una superficie scabra, o attraverso un mezzo viscoso quale l'aria o l'acqua, c'è una resistenza al moto dovuta all'interazione del corpo con ciò che lo circonda. Chiameremo una tale resistenza **forza di attrito**. Le forze di attrito sono molto importanti nella nostra vita quotidiana. Esse ci permettono di camminare e di correre e sono necessarie per il moto dei veicoli a ruote.

Immagina di lavorare nel tuo giardino e di avere riempito il bidone della spazzatura con i residui del taglio dell'erba. Trascini, allora, il bidone sulla superficie del vialetto in cemento, come in Figura 5.1a. Questa è una superficie reale, non una superficie ideale priva d'attrito, come nel modello semplificato. Se, per trascinare il bidone, si applica una forza esterna orizzontale \vec{F} verso destra, il bidone può rimanere fermo se la forza \vec{F} è piccola. La forza che contrasta \vec{F} è, agendo verso sinistra, impedisce al bidone di muoversi si chiama **forza di attrito statico** \vec{f}_s . Fino a quando il bidone non si muove, esso è descrivibile come particella in equilibrio e $f_s = F$; quindi, se \vec{F} aumenta, anche \vec{f}_s aumenta. Allo stesso modo, se \vec{F} diminuisce, anche \vec{f}_s diminuisce.

Gli esperimenti mostrano che questa forza proviene dalla natura delle due superfici. A causa della loro rugosità, si genera una forza di attrito, in parte perché la sporgenza di una superficie blocca fisicamente il movimento di una sporgenza posta sulla superficie opposta ed in parte a causa di legami chimici (saldatura a punti) tra sporgenze contrapposte



▲ **Figura 5.1** (a) e (b) Quando si trascina un bidone della spazzatura, la direzione della forza di attrito \vec{f} tra il bidone e la superficie scabra è opposta alla direzione della forza applicata \vec{F} . (c) Grafico delle forze di attrito in funzione della forza applicata. Si noti che $f_{s,\max} > f_d$

Forza di attrito statico

Experimentalmente si trova, con buona approssimazione, che tanto $f_{s,\max}$ quanto f_d , per un oggetto su una superficie, sono proporzionali alla forza normale esercitata dalla superficie sull'oggetto; adottiamo, perciò, un modello semplificato nel quale questa approssimazione è considerata esatta. Le assunzioni in questo modello semplificato possono essere riasunite come segue.

- Il modulo della forza di attrito statico fra due qualsiasi superfici a contatto può assumere valori dati da

$$f_s \leq \mu_s n \quad (5.1)$$

dove la costante adimensionale μ_s è detta **coefficiente di attrito statico** e n è il modulo della forza normale. L'eguaglianza nell'Equazione 5.1 sussiste quando il blocco è sul punto di iniziare a scivolare, cioè quando $f_s = f_{s,\max} = \mu_s n$. Questa situazione si chiama *moto imminente*. La diseguaglianza vale quando la componente parallela alla superficie della forza applicata è minore di questo valore.

- Il modulo della forza di attrito dinamico agente fra due superfici è

$$f_d = \mu_d n \quad (5.2)$$

dove μ_d è il **coefficiente di attrito dinamico**. Nel nostro modello semplificato, questo coefficiente è indipendente dalla velocità relativa delle superfici.

- I valori di μ_d e μ_s dipendono dalla natura delle superfici, ma μ_d è in generale minore di μ_s . La Tabella 5.1 elenca alcuni valori.
- Il verso della forza d'attrito agente su un oggetto è opposto a quello del moto (attrito cinetico) o a quello del moto imminente (attrito statico) dell'oggetto relativamente alla superficie con la quale è a contatto.

PREVENIRE LE INSIDIE

5.1 Il segno uguale viene utilizzato in situazioni particolari

Nell'Equazione 5.1 il segno uguale è usato *solo* quando le superfici sono sul punto di staccarsi ed iniziare a scivolare. Non cadere nella trappola di usare $f_s = \mu_s n$ in *ogni* situazione di attrito statico.

La natura approssimata delle Equazioni 5.1 e 5.2 è facilmente dimostrata provando a sistemare un oggetto per farlo scivolare su un piano inclinato a velocità costante. Specialmente a basse velocità, è verosimile che il moto sia caratterizzato da una successione alternata di scivolamenti e arresti. Il modello semplificato descritto mediante le assunzioni riportate precedentemente è stato sviluppato in modo tale da poter risolvere i problemi che coinvolgono l'attrito in un modo relativamente semplice.

Ora che abbiamo identificato le caratteristiche della forza d'attrito, possiamo includerla nella forza risultante agente su un oggetto nel modello di particella soggetta a una forza risultante.

nel momento in cui esse vengono a contatto. Sebbene i dettagli della forza di attrito siano alquanto complessi a livello atomico, questa forza discende, in ultima analisi, da una interazione di tipo elettrico tra atomi o molecole.

Se aumentiamo il modulo di \vec{F} , come in Figura 5.1b, il bidone alla fine comincerà a muoversi. Quando il bidone è sul punto di muoversi, f_s è massima, com'è mostrato in Figura 5.1c. Se F supera $f_{s,\max}$, il bidone si muove e accelera verso destra. Quando il bidone è in moto, la forza di attrito diventa minore di $f_{s,\max}$ (Fig. 5.1c). Chiamiamo la forza d'attrito per un oggetto in moto **forza di attrito dinamico**, \vec{f}_d . La forza netta $F - f_d$ nella direzione x produce un'accelerazione verso destra, in accordo con la seconda legge di Newton. Se riduciamo l'intensità della forza fino a rendere $F = f_d$, l'accelerazione diviene nulla e il bidone si muove verso destra con velocità costante. Se la forza applicata viene rimossa, allora la forza di attrito agente verso sinistra fornisce un'accelerazione nella direzione $-x$ e riporta il bidone in quiete.

Experimentalmente si trova, con buona approssimazione, che tanto $f_{s,\max}$ quanto f_d , per un oggetto su una superficie, sono proporzionali alla forza normale esercitata dalla superficie sull'oggetto; adottiamo, perciò, un modello semplificato nel quale questa approssimazione è considerata esatta. Le assunzioni in questo modello semplificato possono essere riasunite come segue.

- Il modulo della forza di attrito statico fra due qualsiasi superfici a contatto può assumere valori dati da

TABELLA 5.1 Coefficienti di attrito

	μ_s	μ_d
Gomma su cemento	1.0	0.8
Acciaio su acciaio	0.74	0.57
Alluminio su acciaio	0.61	0.47
Vetro su vetro	0.94	0.4
Rame su acciaio	0.53	0.36
Legno su legno	0.25-0.5	0.2
Legno cerato su neve bagnata	0.14	0.1
Metallo su metallo (lubrificato)	0.15	0.06
Legno cerato su neve secca	—	0.04
Teflon su teflon	0.04	0.04
Ghiaccio su ghiaccio	0.1	0.03
Giunti sinoviali negli uomini	0.01	0.003

Nota: tutti i valori sono approssimati. In alcuni casi il coefficiente di attrito può essere maggiore di 1.0.

QUI RAPIDO 5.1

Schiaccia il libro di fisica dalla parte piatta contro una parete verticale con la tua mano. Qual è la direzione della forza d'attrito sul libro esercitata dalla parete? (a) Verso il basso. (b) Verso l'alto. (c) Verso l'esterno del muro. (d) Verso l'interno del muro.

QUI RAPIDO 5.2

Una cassa è posta al centro del pianale di un furgone. Il furgone accelera verso est e la cassa si muove con esso senza slittare sul pianale del furgone. Qual è il verso della forza d'attrito esercitata dal pianale del furgone sulla cassa? (a) Ovest. (b) Est. (c) Non c'è forza d'attrito perché la cassa non slitta.

QUI RAPIDO 5.3

Stai giocando con tua figlia sulla neve. Ella siede su uno slittino e ti chiede di farla scivolare lungo un piano orizzontale. Puoi scegliere (a) se spingerla da dietro applicando sulle sue spalle una forza a 30° al di sotto dell'orizzontale (Fig. 5.2a) oppure (b) legare anteriormente allo slittino una fune e tirare con una forza di 30° sull'orizzontale (Fig. 5.2b). Cosa ti risulterebbe più facile e perché?

ESEMPIO 5.1 Il disco da hockey che scivola

Un disco da hockey che si trova su uno specchio d'acqua ghiacciato si muove con velocità iniziale di 20 m/s .

(A) Determinare il coefficiente di attrito dinamico tra disco e ghiaccio se il disco rimane sulla superficie ghiacciata e scivola per 115 m prima di fermarsi.

SOLUZIONE

Concettualizzazione Immagina che il disco in Figura 5.3 scivoli verso destra ed infine si fermi a causa della forza di attrito.

Classificazione La Figura 5.3 mette in evidenza le forze che agiscono sul disco, mentre il testo del problema fornisce variazioni cinematiche. Pertanto possiamo classificare il problema in

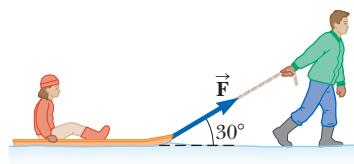
PREVENIRE LE INSIDIE

5.2 La direzione della forza di attrito

Talvolta, circa la forza di attrito, viene scorrettamente affermato che – “La forza di attrito su un oggetto è opposta al moto o al suo moto imminente” – invece di utilizzare l'affermazione corretta, “La forza di attrito su un oggetto è opposta al moto o al moto imminente *relativo tra superficie e oggetto*”. Rifletti attentamente sul Quiz rapido 5.2.

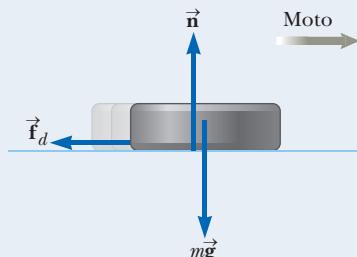


a



b

▲ **Figura 5.2** (Quiz rapido 5.3) Un padre tenta di far scivolare la figlia su una slitta sulla neve (a) spingendo da dietro sulle sue spalle o (b) tirando dal davanti una corda attaccata alla slitta. Quale delle due situazioni è più agevole?



▲ **Figura 5.3** (Esempio 5.1) Dopo che ad un disco viene conferita una velocità iniziale verso destra, le uniche forze agenti sul disco sono la forza di gravità mg , la forza normale \vec{n} e la forza di attrito dinamico \vec{f}_d .

ESEMPIO 5.1 Continua

due modi. In primo luogo, esso coinvolge una particella sottoposta ad una forza netta. Inoltre, dal momento che nella nostra descrizione assumiamo che la forza di attrito sia indipendente dalla velocità, l'accelerazione del disco è costante. Pertanto possiamo classificare questo problema come un caso di particella sottoposta ad accelerazione costante.

Analisi Determiniamo dapprima per via algebrica l'accelerazione in termini del coefficiente di attrito dinamico a partire dalla seconda legge di Newton. Una volta nota l'accelerazione del disco e la distanza percorsa, le equazioni cinematiche possono essere utilizzate per determinare il valore numerico del coefficiente di attrito dinamico. Il diagramma in Figura 5.3 mostra le forze sul disco.

Per la componente del moto lungo l'asse x in presenza di una forza risultante non nulla:

$$(1) \sum F_x = -f_d = ma_x$$

Per la componente del moto lungo l'asse y in presenza di una forza risultante nulla:

$$(2) \sum F_y = n - mg = 0$$

Sostituendo $n = mg$ dall'Equazione (2) e $f_d = \mu_d n$ nell'Equazione (1):

$$\begin{aligned} -\mu_d n &= -\mu_d mg = ma_x \\ a_x &= -\mu_d g \end{aligned}$$

Il segno negativo significa che l'accelerazione è rivolta verso sinistra nella Figura 5.3. Dal momento che la velocità del disco è invece rivolta verso destra, il disco rallenterà. L'accelerazione è indipendente dalla massa del disco e rimane costante a causa dell'assunzione che μ_d sia costante.

Applichiamo il modello di particella in moto con accelerazione costante al disco, utilizzando l'Equazione 2.14, con $x_i = 0$ e $v_f = 0$:

$$0 = v_{xi}^2 + 2a_x x_f = v_{xi}^2 - 2\mu_d g x_f$$

Risolviamo rispetto al coefficiente di attrito dinamico:

$$(3) \mu_d = \frac{v_{xi}^2}{2gx_f}$$

Sostituendo i valori numerici:

$$\mu_d = \frac{(20.0 \text{ m/s})^2}{2(9.80 \text{ m/s}^2)(115 \text{ m})} = 0.177$$

(B) Se la velocità iniziale del disco fosse dimezzata, quale sarebbe la distanza percorsa scivolando?

SOLUZIONE

Questa parte del problema è di tipo comparativo e può essere risolta con un metodo simile a quello utilizzato nell'Esempio 3.4. Risolviamo l'Equazione (3) nella parte (A) rispetto alla posizione finale x_f del disco e la scriviamo due volte, la prima per il caso originario, la seconda per il caso con velocità dimezzata:

$$\begin{aligned} x_{f1} &= \frac{v_{1xi}^2}{2\mu_d g} \\ x_{f2} &= \frac{v_{2xi}^2}{2\mu_d g} = \frac{\left(\frac{1}{2}v_{1xi}\right)^2}{2\mu_d g} = \frac{1}{4} \frac{v_{1xi}^2}{2\mu_d g} \end{aligned}$$

Dividiamo la prima equazione per la seconda:

$$\frac{x_{f1}}{x_{f2}} = 4 \rightarrow x_{f2} = \frac{1}{4}x_{f1}$$

Conclusione Si noti che nella parte (A) il valore di μ_d è adimensionale, come deve essere, e che questo coefficiente ha un valore piccolo, come atteso per un oggetto che scivola sul ghiaccio. Abbiamo poi appreso nella parte (B) che dimezzando la velocità iniziale del disco è possibile ridurre la distanza percorsa del 75%! Applicando questa idea ad un veicolo che scivola, possiamo concludere che guidare a bassa velocità su strade scivolose è un'importante regola di sicurezza.

ESEMPIO 5.2 Un metodo sperimentale per misurare μ_s e μ_d

Il seguente è un semplice metodo per misurare i coefficienti d'attrito. Supponiamo che un blocco sia posto su una superficie scabra inclinata rispetto all'orizzontale, com'è mostrato in Figura 5.4. L'angolo d'inclinazione può essere incrementato fino a quando il blocco inizia a muoversi. Mostra che si può ottenere μ_s dalla misura dell'angolo critico θ_c in corrispondenza del quale il blocco inizia a muoversi.

SOLUZIONE

Concettualizzazione Considera la Figura 5.4 e immagina che il blocco tenda a scivolare verso il basso lungo il piano inclinato a causa della forza di gravità. Per simulare la situazione, poni una moneta sulla copertina di questo libro ed inclinalo fintanto che la moneta inizia a scivolare. Si noti che questo esempio differisce dall'Esempio 4.3. In assenza di attrito sul piano, qualsiasi angolo di inclinazione provocherà il moto di

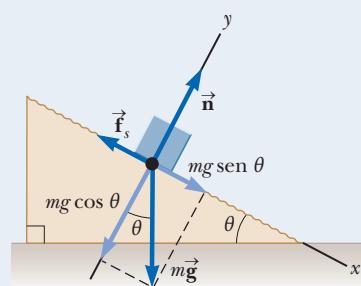


Figura 5.4 (Esempio 5.2) Le forze esterne esercitate su un blocco che giace su una superficie scabra sono la forza di gravità mg , la forza normale \vec{n} e la forza di attrito \vec{f}_s . Per convenienza la forza di gravità è stata scomposta in una componente $mg \sin \theta$ lungo il piano ed una componente $mg \cos \theta$ perpendicolare al piano inclinato.

ESEMPIO 5.2 Continua

un oggetto inizialmente fermo che si trovi sul piano. Al contrario, in presenza di attrito non si osserverà moto dell'oggetto per angoli inferiori all'angolo critico.

Classificazione Il blocco è soggetto a diverse forze. Dal momento che incliniamo il piano ad un angolo per il quale l'oggetto è sul punto di muoversi, ma non si muove ancora, identifichiamo il blocco con una particella in equilibrio.

Analisi Il diagramma in Figura 5.4 mostra le forze agenti sul blocco: la forza gravitazionale $m\vec{g}$, la forza normale \vec{n} e la forza di attrito statico \vec{f}_s . Fissiamo un sistema di riferimento scegliendo l'asse x lungo il piano inclinato e l'asse y ortogonale ad esso. Applichiamo l'Equazione 4.7 al blocco lungo le direzioni x e y :

$$(1) \sum F_x = mg \sin \theta - f_s = 0$$

$$(2) \sum F_y = n - mg \cos \theta = 0$$

Sostituendo $mg = n / \cos \theta$ dall'Equazione (2) nell'Equazione (1):

$$(3) f_s = mg \sin \theta = \left(\frac{n}{\cos \theta} \right) \sin \theta = n \tan \theta$$

Quando l'angolo di inclinazione viene aumentato al valore in corrispondenza del quale il blocco è sul punto di scivolare, la forza di attrito statico raggiunge il suo valore massimo $\mu_s n$. L'angolo θ in questa situazione viene detto angolo critico θ_c . Effettuando queste sostituzioni nell'Equazione (3):

$$\mu_s n = n \tan \theta_c$$

$$\mu_s = \tan \theta_c$$

Per esempio, se il blocco inizia a scivolare per $\theta_c = 20.0^\circ$, si trova che $\mu_s = \tan 20.0^\circ = 0.364$.

Conclusione Una volta che, per $\theta \geq \theta_c$, il blocco inizia a muoversi, esso accelera verso il basso lungo il piano inclinato e la forza d'attrito diviene $f_d = \mu_d n$. Se ora θ viene ridotto ad un valore inferiore a θ_c , è possibile che esista un angolo θ'_c per il quale il blocco continuerà a muoversi lungo il piano inclinato a velocità costante come una particella in equilibrio ($a_x = 0$). In questo caso, utilizzando le Equazioni (1) e (2) con f_d al posto di f_s , si trova che $\mu_d = \tan \theta'_c$, dove $\theta'_c < \theta_c$

Ulteriori approfondimenti in e-book: Esempio E5.1 Accelerazione di due oggetti collegati in presenza di attrito.

5.2 | Particella in moto circolare uniforme

La risoluzione dei problemi che coinvolgono forze di attrito è solo una delle tante applicazioni della seconda legge di Newton. Consideriamo ora un'altra situazione comune, ovvero una particella che si muove di moto circolare uniforme. Nel Capitolo 3 abbiamo visto come una particella che si muove su di una traiettoria circolare di raggio r con velocità scalare v sia sottoposta ad un'accelerazione centripeta di modulo

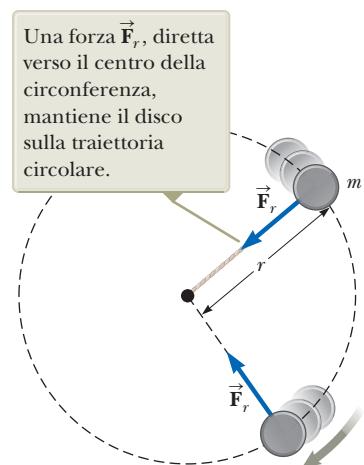
$$a_c = \frac{v^2}{r}$$

Il vettore accelerazione è diretto verso il centro della circonferenza ed è *sempre* perpendicolare a \vec{v} .

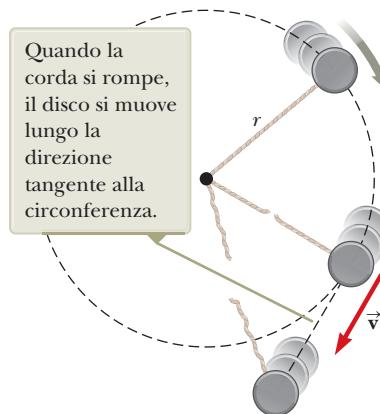
In virtù della seconda legge di Newton, se si osserva un'accelerazione essa è necessariamente prodotta da una forza non nulla. Poiché l'accelerazione è diretta verso il centro della circonferenza, la forza deve agire *verso l'interno* sulla particella che compie il moto circolare. In questo paragrafo ci occuperemo delle forze che producono questo tipo di accelerazione.

Consideriamo un disco di massa m , legato ad una corda di lunghezza r e in moto a velocità scalare costante lungo una traiettoria circolare orizzontale, come illustrato nella Figura 5.5. Il peso viene bilanciato da un piano privo di attrito e la corda è ancorata ad un giunto posto al centro del percorso circolare del disco. Perché il disco si muove lungo la circonferenza? La tendenza naturale del disco è di muoversi lungo una traiettoria rettilinea, come previsto dalla prima legge di Newton. La corda, però, impedisce il moto rettilineo imponendo una forza radiale \vec{F}_r sul disco, che compie così una traiettoria circolare. Questa forza, il cui modulo è pari alla tensione della corda, è diretta secondo la direzione della corda e verso il centro della circonferenza, come mostrato in Figura 5.5.

Accelerazione centripeta



▲ **Figura 5.5** Visione dall'alto di un disco che si muove lungo una traiettoria circolare su un piano orizzontale.



▲ **Figura 5.6** La corda che mantiene il disco lungo la traiettoria circolare si rompe.

PREVENIRE LE INSIDIE

5.3 Direzione del moto quando la corda viene tagliata

Studia attentamente la Figura 5.6. Molti studenti hanno la concezione erronea che il disco si allontani *radialmente* dal centro del cerchio quando la corda viene tagliata. La velocità del disco è *tangente* al cerchio. Secondo la prima legge di Newton, il disco mantiene il suo moto lungo la direzione nella quale si stava muovendo nel momento in cui la forza della corda svanisce.

Secondo questa analisi, la tensione della corda è la causa del moto circolare del disco. Forze di altra natura possono essere all'origine del moto circolare degli oggetti. Per esempio le forze di attrito consentono alle automobili di muoversi lungo strade tortuose mentre la forza gravitazionale fa sì che un pianeta orbiti attorno al Sole.

A prescindere dalla natura delle forze che agiscono sulla particella in moto circolare si può applicare la seconda legge di Newton lungo la direzione radiale:

$$\sum F = ma_c = m \frac{v^2}{r} \quad (5.3)$$

Se la forza radiale che agisce sul corpo si annulla, il corpo non proseguirà più nel suo moto circolare. Questa idea viene illustrata in Figura 5.6 nel caso del disco che si muove lungo la traiettoria circolare all'estremità della corda. Se ad un certo istante la corda si rompe, il disco si muoverà lungo la linea retta, tangente alla circonferenza nel punto in cui si trovava il disco in quel dato istante.

Ulteriori approfondimenti in e-book: Quiz rapido E5.1 e Fisica ragionata E5.1.

PREVENIRE LE INSIDIE

5.5 La forza centripeta

La forza che provoca l'accelerazione centripeta viene detta *forza centripeta* in alcuni testi. Dare un nome alla forza che provoca il moto circolare porta molti studenti a considerarla come un nuovo *tipo* di forza piuttosto che attribuire alla forza un nuovo *ruolo*. Un errore comune è quello di disegnare le forze in un diagramma di corpo libero e quindi aggiungere un altro vettore per la forza centripeta. Tuttavia non è una forza distinta; è una delle forze a noi familiari che *agisce in modo da provocare un moto circolare*. Per il moto della Terra attorno al Sole, ad esempio, la “forza centripeta” è la *gravità*. Per una roccia che viene fatta roteare appesa all'estremità di un filo, la “forza centripeta” è la *tensione* del filo. Dopo questa discussione non utilizzeremo più l'espressione *forza centripeta*.

PREVENIRE LE INSIDIE

5.4 La forza centrifuga

L'espressione comunemente utilizzata “forza centrifuga” viene riferita alla forza che spinge *verso l'esterno* un oggetto che si muove su una traiettoria circolare. Se stai sperimentando una “forza centrifuga” su una giostra che ruota, con quale altro oggetto stai interagendo? Non riesci ad identificare alcun oggetto con cui interagisci perché la forza centrifuga è una forza fittizia.



La forza normale delle rotaie contribuisce a fornire l'accelerazione centripeta. La forza gravitazionale, dal momento che rimane costante in direzione e verso, agisce in alcuni punti nello stesso verso della forza normale ed in altri è ad essa opposta.

ESEMPIO 5.3 Quanto velocemente riesce a ruotare?

Un disco di massa 0.500 kg è collegato all'estremità di una corda lunga 1.50 m. Il disco si muove su di una traiettoria circolare, come mostrato in Figura 5.5. Se la corda riesce a sostenere una tensione massima di 50.0 N, qual è la massima velocità a cui il disco può muoversi senza che la corda si rompa? Si assuma che la corda rimanga orizzontale durante il moto.

SOLUZIONE

Concettualizzazione È ragionevole ritenere che tanto più robusta sia la corda, tanto più velocemente il disco possa ruotare senza che la corda si rompa. Inoltre possiamo attenderci che un disco più massiccio provochi la rottura della corda a velocità inferiore (prova ad immaginare una palla da bowling attaccata alla corda).

Classificazione Dal momento che il disco si muove su di una traiettoria circolare, utilizziamo come modello quello di una particella che si muove di moto circolare uniforme.

Analisi Introduciamo la tensione e l'accelerazione centripeta nell'espressione della seconda legge di Newton riportata nell'Equazione 5.3:

$$T = m \frac{v^2}{r}$$

Risolvendo rispetto a v :

$$(1) \quad v = \sqrt{\frac{Tr}{m}}$$

Troviamo ora la massima velocità del disco, che si osserva in corrispondenza alla massima tensione che può essere sopportata dalla corda:

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{T_{\max}r}{m}} = \sqrt{\frac{(50.0 \text{ N})(1.50 \text{ m})}{0.500 \text{ kg}}} = 12.2 \text{ m/s}$$

Conclusione L'Equazione (1) mostra che v cresce con T e decresce con m , come atteso dall'inquadramento del problema.

E se...? Supponiamo che il disco si muova su di una circonferenza di raggio maggiore ma con la stessa velocità. In queste condizioni sarà più facile o più difficile che la corda si rompa?

Risposta Il raggio maggiore implica che il cambiamento di direzione del vettore velocità in un dato intervallo di tempo sarà inferiore. Pertanto l'accelerazione risulta inferiore e con essa la conseguente tensione della corda. Di conseguenza la corda si romperà più difficilmente quando il disco percorre una circonferenza di raggio maggiore.

Ulteriori approfondimenti in e-book: Esempio E5.2 Il pendolo conico.

ESEMPIO 5.4 Qual è la velocità massima dell'auto?

Un'auto di massa 1 500 kg, che si muove su una strada orizzontale piana, affronta una curva di 35.0 m di raggio, come mostrato in Figura 5.7a. Se il coefficiente di attrito statico tra gli pneumatici ed il terreno asciutto è 0.523, trovare la velocità massima che l'auto può mantenere per affrontare, con successo, la curva.

SOLUZIONE

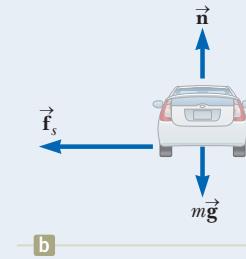
Concettualizzazione Immaginiamo che il tratto di strada curva sia parte di un ampio cerchio di modo che l'auto si muova di moto circolare.

Classificazione In base all'inquadramento del problema esso ricade nel caso di una particella in moto circolare uniforme nel piano orizzontale. L'auto non accelera verticalmente pertanto viene descritta come una particella in equilibrio lungo questa direzione.

Analisi La Figura 5.7b mostra le forze agenti sull'auto. La forza che consente all'auto di percorrere la traiettoria circolare è la forza di attrito statico. (L'attrito è *statico* in quanto non c'è slittamento al punto di contatto tra strada e pneumatico. Se questa forza fosse zero, per esempio se l'auto fosse su di una strada ghiacciata, essa proseguirebbe su di una linea retta e scivolerebbe fuori strada.) La velocità massima v_{\max} che può raggiungere l'auto nel tratto di curva è quella in corrispondenza della quale l'auto è sul punto di slittare verso l'esterno. In



► **Figura 5.7** (Esempio 5.4) (a) La forza di attrito statico diretta verso il centro della curva mantiene l'auto sulla traiettoria circolare. (b) Le forze che agiscono sull'auto.



queste condizioni la forza di attrito statico raggiunge il suo valore massimo $f_{s,\max} = \mu_s n$.

ESEMPIO 5.4 Continua

Applichiamo l'Equazione 5.3 nella direzione radiale per la condizione di massima velocità:

$$(1) f_{s,\max} = \mu_s n = m \frac{v_{\max}^2}{r}$$

Applichiamo all'auto il modello di particella in equilibrio lungo la direzione verticale:

$$\sum F_y = 0 \rightarrow n - mg = 0 \rightarrow n = mg$$

Risolviamo l'Equazione (1) rispetto alla velocità massima e sostituiamo l'espressione di n :

$$(2) v_{\max} = \sqrt{\frac{\mu_s nr}{m}} = \sqrt{\frac{\mu_s m gr}{m}} = \sqrt{\mu_s gr}$$

Sostituiamo i valori numerici:

$$v_{\max} = \sqrt{(0.523)(9.80 \text{ m/s}^2)(35.0 \text{ m})} = 13.4 \text{ m/s}$$

Conclusione Questa velocità è equivalente a 48.2 km/h. Pertanto, se su questa strada il limite di velocità fosse maggiore di 48.2 km/h, si avrebbe grande beneficio dall'introduzione di curve sopraelevate, come nell'esempio che segue. Si noti come

la velocità massima non dipenda dalla massa dell'auto, il che comporta la mancanza di necessità di adeguare i limiti di velocità ai diversi veicoli.

E se...? Supponiamo che l'auto percorra questa curva in un giorno di pioggia ed inizi a slittare quando raggiunge la velocità di 8.0 m/s. Cosa possiamo dire riguardo al coefficiente di attrito statico in questo caso?

Risposta Il coefficiente di attrito statico tra pneumatici e strada bagnata dovrebbe essere inferiore a quello per una strada asciutta. Questa previsione è in accordo con l'esperienza che è più facile slittare su una strada bagnata che su una asciutta. Per verificare la nostra ipotesi possiamo risolvere l'Equazione (2) rispetto al coefficiente di attrito statico:

$$\mu_s = \frac{v_{\max}^2}{gr}$$

Sostituendo i valori numerici otteniamo

$$\mu_s = \frac{v_{\max}^2}{gr} = \frac{(8.00 \text{ m/s})^2}{(9.80 \text{ m/s}^2)(35.0 \text{ m})} = 0.187$$

che in effetti è inferiore al coefficiente di 0.523 per la strada asciutta.

ESEMPIO 5.5 La strada sopraelevata

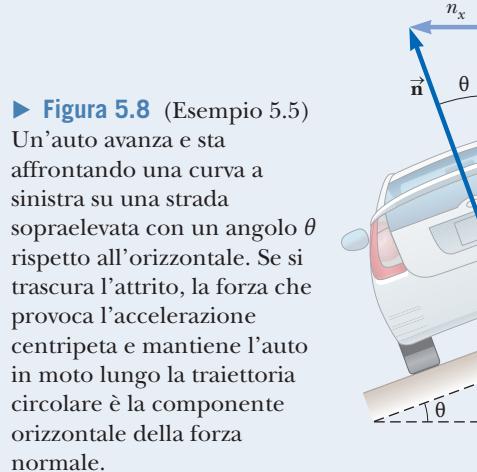
Un ingegnere civile desidera riprogettare la strada curva dell'Esempio 5.4 in modo che un'auto non debba dipendere dall'attrito per percorrere la curva senza sbandare. In altre parole, un'auto che viaggia alla velocità prevista è capace di superare la curva anche se la strada è coperta di ghiaccio. Tale curva viene di solito *sopraelevata*, intendendo con ciò che la carreggiata è inclinata verso l'interno della curva, come si può vedere nella fotografia sulla prima pagina di questo capitolo. Supponi che la velocità progettata per la curva sia 13.4 m/s (48.2 km/h) e che il raggio della curva sia di 35.0 m. A quale angolo la curva dovrebbe essere soprelevata?

SOLUZIONE

Concettualizzazione La differenza tra questo esempio e l'Esempio 5.4 è che in questo caso l'auto non si muove su di una strada piana. La Figura 5.8 mostra la strada soprelevata, con il centro della traiettoria circolare lontano alla sinistra della figura. Si noti che la componente orizzontale della forza normale contribuisce a generare l'accelerazione centripeta.

Classificazione Come già nell'Esempio 5.4, l'auto viene descritta dal modello della particella in equilibrio lungo la direzione verticale e dal modello della particella in moto circolare uniforme nel piano orizzontale.

Analisi Su una strada a livello (non soprelevata), la forza che causa l'accelerazione centripeta è la forza di attrito statico fra la strada e l'auto, come abbiamo visto nell'esempio precedente. Se la strada è soprelevata di un angolo θ , come in Figura



► **Figura 5.8** (Esempio 5.5)

Un'auto avanza e sta affrontando una curva a sinistra su una strada sopraelevata con un angolo θ rispetto all'orizzontale. Se si trascura l'attrito, la forza che provoca l'accelerazione centripeta e mantiene l'auto in moto lungo la traiettoria circolare è la componente orizzontale della forza normale.

5.8, la forza normale \vec{n} ha sempre una componente orizzontale diretta verso il centro della curva. Poiché la curva deve essere progettata in modo che la forza di attrito statico sia nulla, l'accelerazione centripeta deve essere causata solamente alla componente $n_x = n \sin \theta$.

Scriviamo la seconda legge di Newton per l'auto nella direzione radiale, che è la direzione x :

$$(1) \sum F_r = n \sin \theta = \frac{mv^2}{r}$$

ESEMPIO 5.5 Continua

Applichiamo il modello di particella in equilibrio nella direzione verticale:

$$\begin{aligned} \sum F_y &= n \cos \theta - mg = 0 \\ (2) \quad n \cos \theta &= mg \end{aligned}$$

Dividiamo l'Equazione (1) per l'Equazione (2):

$$(3) \quad \tan \theta = \frac{v^2}{rg}$$

Ricaviamo infine l'angolo θ :

$$\theta = \tan^{-1} \left[\frac{(13.4 \text{ m/s})^2}{(35.0 \text{ m})(9.80 \text{ m/s}^2)} \right] = 27.6^\circ$$

Conclusione L'Equazione (3) mostra che l'angolo di inclinazione è indipendente dalla massa del veicolo che affronta la

curva. Se l'auto affronta la curva ad una velocità minore di 13.4 m/s, è necessario l'attrito per impedire che essa slitti verso il basso lungo la soprelevazione (verso sinistra in Fig. 5.8). Un automobilista che tenti di superare la curva ad una velocità superiore a 13.4 m/s deve contare sull'attrito per impedire lo slittamento verso l'alto della soprelevazione (verso destra in Fig. 5.8).

E se...? Immaginiamo che la stessa strada nel futuro venga costruita su Marte per connettere diversi centri di una colonia. Potrà essere percorsa alla stessa velocità?

Risposta La forza gravitazionale ridotta presente su Marte comporta che l'auto non sia pressata così fortemente sulla strada. La forza normale di minore entità ridurrà la componente della forza normale diretta verso il centro della traiettoria circolare.

Da un punto di vista matematico si noti come l'Equazione (3) mostri che la velocità v sia proporzionale alla radice quadrata di g per una strada di raggio r e soprelevata ad un angolo θ . Pertanto, se g su Marte è inferiore, lo sarà anche la velocità con cui la curva si può percorrere in sicurezza.

ESEMPIO 5.6 Un giro sulla ruota panoramica

Un bambino di massa m sta facendo un giro su una ruota panoramica, come rappresentato in Figura 5.9a. Il bambino percorre una circonferenza verticale di raggio 10 m alla velocità, di modulo costante, pari a 3 m/s.

(A) Determinare la forza esercitata dal sedile sul bambino nel punto più basso della circonferenza. Eprimere la risposta in funzione del peso del bambino, mg .

SOLUZIONE

Concettualizzazione Guarda attentamente la Figura 5.9a. Sulla base dell'esperienza che potresti avere fatto nel compiere un giro su una ruota panoramica, oppure guidando un'auto lungo una strada che percorre piccole colline, ti aspetti di sentirti più leggero nel punto più alto della traiettoria. Viceversa, ti attendi di sentirti più pesante nel punto più basso della traiettoria. In entrambe le situazioni, il punto più alto ed il punto più basso, la forza di gravità e la forza normale agiscono in verso *opposto*. Il vettore somma di queste due forze dà una forza di intensità (modulo) costante che mantiene il bambino lungo la traiettoria circolare a velocità costante. Per mantenere il modulo della forza risultante costante la forza normale nel punto più basso deve essere maggiore di quella nel punto più alto.

Classificazione Poiché la velocità del bambino è costante, questo problema può essere descritto dal modello di una particella in moto circolare uniforme, complicato dalla forza gravitazionale che agisce sul bambino in ogni istante.

Analisi Il diagramma di corpo libero per il bambino nel punto più basso della circonferenza è riportato in Figura 5.9b. Le forze agenti sul bambino sono la forza di gravità verso il basso, $\vec{F}_g = mg$, e la forza, diretta verso l'alto, \vec{n}_{basso} , esercitata dal sedile. La forza risultante verso l'alto, che determina l'accelerazione centripeta, è $n_{\text{basso}} - mg$.

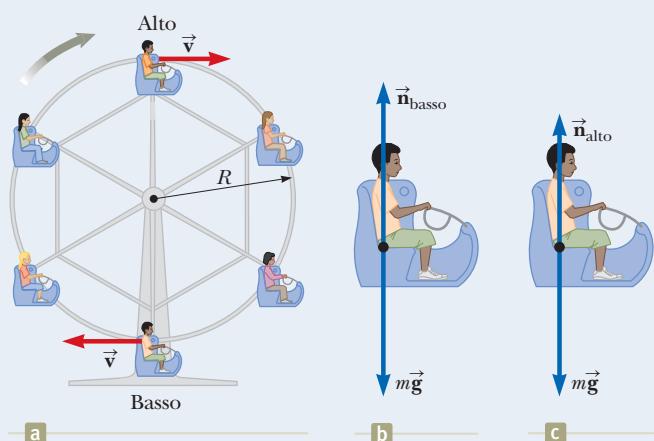


Figura 5.9 (Esempio 5.6) (a) Un bambino sta facendo un giro su una ruota panoramica. (b) Le forze che agiscono sul bambino nel punto più basso del giro. (c) Le forze che agiscono sul bambino nel punto più alto del percorso.

La seconda legge di Newton applicata al bambino dà per la direzione radiale nel punto più basso della traiettoria:

$$\sum F = n_{\text{basso}} - mg = m \frac{v^2}{r}$$

Risolvendo rispetto alla forza esercitata dal sedile sul bambino:

$$n_{\text{basso}} = mg + m \frac{v^2}{r} = mg \left(1 + \frac{v^2}{rg} \right)$$

ESEMPIO 5.6 Continua

Sostituendo i valori dati della velocità e del raggio:

$$n_{\text{basso}} = mg \left[1 + \frac{(3.00 \text{ m/s})^2}{(10.0 \text{ m})(9.80 \text{ m/s}^2)} \right]$$

$$= 1.09 mg$$

Pertanto il modulo della forza \vec{n}_{basso} esercitata dal sedile sul bambino è *maggior* del peso del bambino di un fattore 1.09. Quindi, il bambino percepisce un peso apparente maggiore di un fattore 1.09 rispetto al suo peso reale.

(B) Determinare la forza esercitata dal sedile sul bambino nel punto più alto del giro.

SOLUZIONE

Analisi Il diagramma di corpo libero per il bambino nel punto più alto della traiettoria è mostrato nella Figura 5.9c. La forza risultante verso il basso che causa l'accelerazione centripeta ha modulo pari a $mg - n_{\text{alto}}$.

Applicando la seconda legge di Newton al bambino in questa posizione:

$$\sum F = mg - n_{\text{alto}} = m \frac{v^2}{r}$$

Risolvendo rispetto alla forza esercitata dal sedile sul bambino:

$$n_{\text{alto}} = mg - m \frac{v^2}{r} = mg \left(1 - \frac{v^2}{rg} \right)$$

Sostituendo i valori numerici:

$$n_{\text{alto}} = mg \left[1 - \frac{(3.00 \text{ m/s})^2}{(10.0 \text{ m})(9.80 \text{ m/s}^2)} \right]$$

$$= 0.908 mg$$

In questo caso la forza esercitata dal sedile sul bambino è inferiore al peso reale del bambino di un fattore 0.908 e questo dà al bambino la sensazione di essere più leggero.

Conclusione Le variazioni nella forza normale sono in accordo con la predizione anticipata nella Concettualizzazione.

E se...? Supponiamo che un difetto nel meccanismo della ruota panoramica provochi un aumento della velocità del bambino fino a 10.0 m/s. Cosa sperimenta il bambino nelle nuove condizioni nel punto più alto della traiettoria?

Risposta Se il calcolo riportato sopra viene ripetuto con $v = 10.0 \text{ m/s}$, la forza normale nel punto più alto risulta negativa, cosa che è impossibile. Questo può essere considerato come indicazione del fatto che l'accelerazione centripeta necessaria al bambino supera l'accelerazione di gravità. In conseguenza di ciò, il bambino perderebbe contatto con il sedile e rimarrebbe lungo la traiettoria circolare solo se ci fosse una barra di sicurezza in grado di fornire una forza aggiuntiva verso il basso che lo mantenga sul sedile. Nel punto più basso la forza normale sarebbe 2.02 mg e risulterebbe fastidiosa.

5.3 | Particella in moto circolare non uniforme

Nel Capitolo 3 abbiamo trovato che, se una particella si muove con velocità variabile in modulo lungo una traiettoria circolare, ciò implica, oltre ad una componente radiale, una componente tangenziale dell'accelerazione di modulo pari a dv/dt . Quindi, la forza risultante che agisce sulla particella deve anche avere una componente tangenziale oltre che radiale, come mostrato in Figura 5.10. Poiché l'accelerazione totale è $\vec{a} = \vec{a}_r + \vec{a}_t$, la forza totale esercitata sulla particella è data da: $\sum \vec{F} = \sum \vec{F}_r + \sum \vec{F}_t$ (Esprimiamo le forze tangenziali e radiali come forze risultanti perché ciascuna forza potrebbe consistere di forze multiple che si combinano.) Il vettore componente, $\sum \vec{F}_r$, è diretto verso il centro della circonferenza ed è responsabile dell'accelerazione centripeta. Il vettore componente, $\sum \vec{F}_t$, tangente alla circonferenza, è responsabile dell'accelerazione tangenziale che causa la variazione del modulo della velocità della particella rispetto al tempo.

QUIZ RAPIDO 5.4

Quale delle seguenti affermazioni è *impossibile* per un'auto che si muova lungo una traiettoria circolare? Si assuma che l'auto non sia mai ferma. (a) L'auto ha accelerazione tangenziale diversa da zero ma non ha accelerazione centripeta. (b) L'auto ha accelerazione centripeta ma non ha accelerazione tangenziale. (c) L'auto possiede sia accelerazione centripeta che tangenziale.

La forza netta esercitata sulla particella è il vettore dato dalla somma della forza radiale e della forza tangenziale.

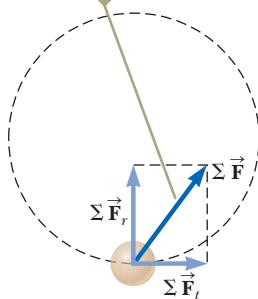
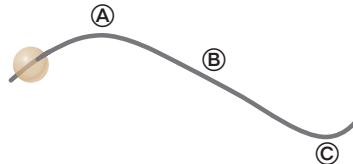


Figura 5.10 Quando la forza risultante sulla particella che si muove su una traiettoria circolare ha una componente tangenziale $\sum \vec{F}_t$, la sua velocità cambia.

QUIZ RAPIDO 5.5

Una perlina scivola liberamente lungo un filo curvo muovendosi a velocità costante come mostrato in Figura 5.11. (a) Disegna i vettori che rappresentano la forza esercitata dal filo sulla perlina nei punti (A), (B) e (C). (b) Supponiamo che la perlina in Figura 5.11 si muova con accelerazione tangenziale costante mentre si muove verso destra. Disegna i vettori che rappresentano la forza esercitata sulla perlina nei punti (A), (B) e (C).



► **Figura 5.11** (Quiz rapido 5.5)
Una perlina scivola lungo un filo curvo.

ESEMPIO 5.7 Tieni d'occhio la sfera

Una piccola sfera di massa m è legata all'estremità di un filo di lunghezza R , che ruota sotto l'azione della forza gravitazionale e della forza esercitata dal filo in una circonferenza *verticale*, intorno a un punto fisso O , come in Figura 5.12. Determina l'accelerazione tangenziale della sfera e la tensione del filo in un generico istante in cui la velocità della sfera è v e il filo forma un angolo θ con la verticale.

SOLUZIONE

Concettualizzazione Si confronti il moto della sfera in Figura 5.12 con quello del bambino in Figura 5.9a associata all'Esempio 5.6. Entrambi gli oggetti si muovono lungo una traiettoria circolare. A differenza del caso del bambino nell'Esempio 5.6, in questo caso la velocità *non* è uniforme perché, lungo il percorso, in quasi tutti i punti della traiettoria, agisce una componente tangenziale dell'accelerazione derivante dalla forza esercitata dalla forza di gravità sulla sfera.

Classificazione Applichiamo alla sfera il modello di una particella sottoposta all'azione di una forza risultante non nulla e che si muove lungo una traiettoria circolare, anche se non è una particella in moto circolare *uniforme*. Utilizzeremo i metodi sviluppati in questo paragrafo per i moti circolari non uniformi.

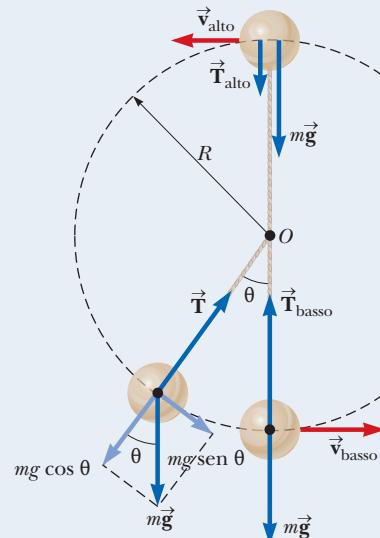
Analisi Dal diagramma di corpo libero in Figura 5.12 vediamo che le sole forze agenti sulla sfera sono la forza gravitazionale $\vec{F}_g = m\vec{g}$ esercitata dalla Terra e la forza \vec{T} esercitata dal filo. Scomponiamo \vec{F}_g nelle componenti tangenziale $mg \sin \theta$ e radiale $mg \cos \theta$.

Applichiamo la seconda legge di Newton alla sfera lungo la direzione tangenziale:

$$\sum F_t = mg \sin \theta = ma_t \\ a_t = g \sin \theta$$

Applichiamo quindi la seconda legge di Newton alle forze che agiscono sulla sfera lungo la direzione radiale, notando che \vec{T} ed \vec{a}_r sono dirette verso O :

$$\sum F_r = T - mg \cos \theta = \frac{mv^2}{R} \\ T = mg \left(\frac{v^2}{R} + \cos \theta \right)$$



▲ **Figura 5.12** (Esempio 5.7) Forze che agiscono sulla sfera di massa m connessa ad una corda di lunghezza R e che ruota lungo una traiettoria circolare verticale di centro O . Le forze che agiscono sulla sfera sono mostrate nei casi in cui la sfera si trova alla sommità, nel punto più basso ed in un punto generico della traiettoria.

Conclusione Valutiamo questo risultato nel punto più alto e nel punto più basso della traiettoria circolare (Fig. 5.12):

$$T_{\text{alto}} = mg \left(\frac{v_{\text{alto}}^2}{Rg} - 1 \right) \quad T_{\text{basso}} = mg \left(\frac{v_{\text{basso}}^2}{Rg} + 1 \right)$$

Questi risultati sono matematicamente simili a quelli ottenuti per le forze n_{alto} e n_{basso} agenti sul bambino nell'Esempio 5.6. Ciò discende dal fatto che, nei punti più alto e più basso della traiettoria, la forza normale, agente sul bambino, gioca nell'Esempio 5.6 un ruolo simile a quello della tensione della corda nel presente esempio. Occorre però fare attenzione al fatto che, contrariamente alla forza normale \vec{n} nell'Esempio 5.6, la tensione \vec{T} , in questo esempio, cambia continuamente direzione in quanto deve puntare sempre verso l'interno lungo la corda. Inoltre si noti come l'espressione di v sia differente per le diverse posizioni della sfera, come indicato dai pedici, mentre nell'Esempio 5.6 v rimane costante.

5.4 | Moto in presenza di forze d'attrito dipendenti dalla velocità

Precedentemente abbiamo descritto la forza d'attrito fra un corpo in moto e la superficie sulla quale esso si muove. Abbiamo trascurato totalmente qualunque interazione tra il corpo e il mezzo nel quale esso si muove. Consideriamo, adesso, l'effetto di un mezzo, come un liquido o un gas. Il mezzo esercita una **forza d'attrito** \vec{R} sul corpo che si muove attraverso di esso. Si può avvertire questa forza se si viaggia in macchina ad alta velocità con la mano fuori dal finestrino; la forza che spinge indietro la mano è la forza dovuta all'aria che fluisce al di là della macchina. Il modulo di questa forza dipende dalla velocità relativa fra l'oggetto e il mezzo e il verso di \vec{R} sull'oggetto è sempre opposto a quello del moto dell'oggetto relativo al mezzo. Alcuni esempi sono la resistenza dell'aria associata con il moto dei veicoli, la forza del vento sulle vele di un'imbarcazione e le forze viscose che agiscono sugli oggetti che affondano in un liquido.

Generalmente, il modulo di una tale forza d'attrito aumenta con l'aumentare della velocità. La forza d'attrito può avere una dipendenza complessa dalla velocità. Nella discussione seguente, considereremo due modelli semplificati che ci permettono di analizzare queste situazioni. Nel primo modello, assumeremo che la forza d'attrito sia proporzionale al modulo della velocità; questo è il caso di oggetti che si muovono in un liquido a bassa velocità e per oggetti piccolissimi, come le particelle di polvere, che si muovono in aria. Nel secondo modello, tratteremo situazioni in cui il modulo della forza d'attrito sia proporzionale al quadrato della velocità del corpo. Oggetti estesi, come i paracadutisti che si muovono in aria in caduta libera, saranno sottoposti a tale forza.

Modello 1: forza d'attrito proporzionale alla velocità dell'oggetto

Per basse velocità, la forza d'attrito agente su un corpo che si muove in un mezzo viscoso è proporzionale alla velocità del corpo. La rappresentazione matematica di questa forza di trascinamento viscoso si può esprimere come

$$\vec{R} = -b\vec{v} \quad (5.4)$$

dove \vec{v} è la velocità dell'oggetto e b è una costante che dipende dalle proprietà del mezzo, dalla forma e dalle dimensioni dell'oggetto. Il segno negativo rappresenta il fatto che la forza di attrito è opposta alla velocità dell'oggetto.

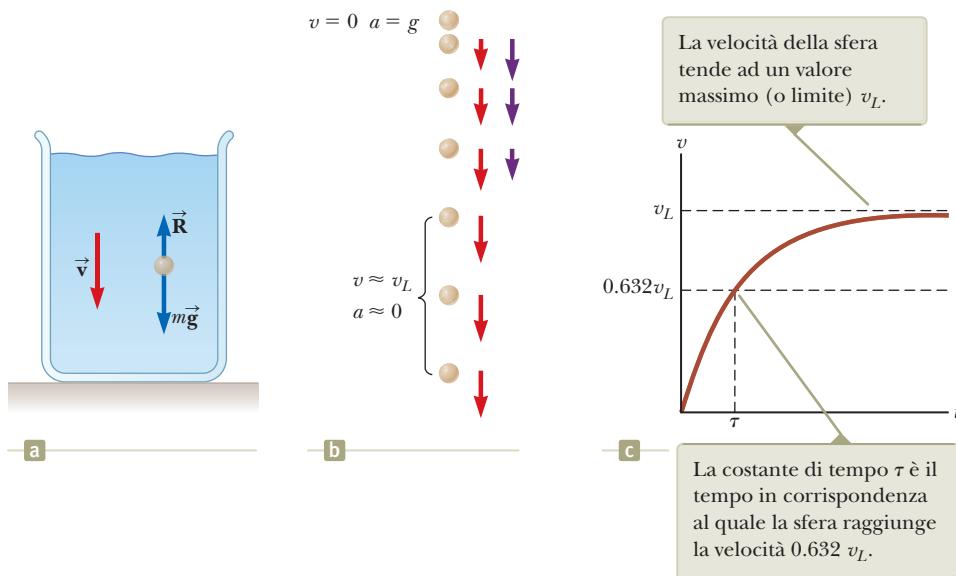
Si consideri una sfera di massa m lasciata cadere da ferma in un liquido, come in Figura 5.13a. Assumendo che le uniche forze che agiscono sulla sfera siano la forza di trascinamento viscoso \vec{R} e la forza peso $m\vec{g}$, possiamo descrivere il suo moto applicando la seconda legge di Newton¹. Considerando il moto verticale e scegliendo come positiva la direzione rivolta verso il basso abbiamo

$$\sum F_y = ma_y \rightarrow mg - bv = m \frac{dv}{dt}$$

Dividendo questa equazione per m otteniamo

$$\frac{dv}{dt} = g - \frac{b}{m} v \quad (5.5)$$

¹ Una *forza di galleggiamento* agisce su ogni oggetto immerso in un fluido. Questa forza è costante e pari al peso del fluido spostato, come verrà discusso nel Capitolo 13. L'effetto di questa forza può essere descritto mediante una alterazione del peso della sfera di un fattore moltiplicativo costante.



◀ **Figura 5.13** (a) Una sferetta che cade in un liquido. (b) Diagramma del moto della sfera mentre cade. Per ogni immagine a partire dalla seconda sono mostrati il vettore velocità (rosso) ed il vettore accelerazione (viola). (c) Il grafico velocità-tempo per la sfera.

L'Equazione 5.5 viene detta *equazione differenziale*; essa include sia la velocità v che la derivata della velocità. I metodi per risolvere una tale equazione possono non essere ancora familiari al lettore. Comunque, si osservi che inizialmente, se definiamo $t = 0$ quando $v = 0$, la forza di trascinamento viscoso è nulla e l'accelerazione, dv/dt , è semplicemente g . Al crescere di t , la velocità aumenta, la forza di trascinamento viscoso aumenta e l'accelerazione diminuisce. Così, questo problema è uno di quelli in cui sia la velocità che l'accelerazione della particella non sono costanti.

L'accelerazione diventa nulla quando la forza viscosa diventa uguale al peso. A questo punto, il corpo raggiunge la sua **velocità limite** v_L e da questo momento continua a muoversi con accelerazione nulla. Il diagramma del moto nella Figura 5.13b mostra la sfera che accelera nella prima parte del moto per raggiungere in un secondo tempo la sua velocità limite. Dopo avere raggiunto questa velocità, il moto è quello di una particella con velocità costante. La velocità limite può ricavarsi dall'Equazione 5.5, ponendo $a = dv/dt = 0$. Il risultato è

$$mg - bv_L = 0 \rightarrow v_L = \frac{mg}{b}$$

La funzione v che soddisfa l'Equazione 5.5 con $v = 0$ nell'istante $t = 0$ è

$$v = \frac{mg}{b}(1 - e^{-bt/m}) = v_L(1 - e^{-t/\tau}) \quad (5.6)$$

dove $v_L = mg/b$, $\tau = m/b$ ed $e = 2.718\,28$ è la base dei logaritmi naturali. Questa espressione per v può essere verificata sostituendo questa soluzione nell'Equazione 5.5. (Prova!) Il grafico di questa funzione è riportato nella Figura 5.13c.

La rappresentazione matematica del moto (Eq. 5.6) indica che, quando la funzione esponenziale diventa molto piccola a valori elevati di t , la velocità della particella si può approssimare alla velocità limite.

Per confrontare questi comportamenti esponenziali di oggetti diversi, utilizziamo un parametro detto **costante di tempo**. La costante di tempo $\tau = m/b$ che compare nell'Equazione 5.6 è il tempo necessario al fattore in parentesi nell'Equazione 5.6 per diventare uguale a $1 - e^{-1} = 0.632$. Così, la costante di tempo rappresenta il tempo necessario all'oggetto per raggiungere il 63.2% della sua velocità limite (Fig. 5.13c).

ESEMPIO 5.8 La sfera che cade nell'olio

Una sferetta di massa 2.00 g, inizialmente ferma, è lasciata cadere in un lungo cilindro riempito di olio, dove è sottoposta ad una forza di trascinamento viscoso proporzionale alla velocità. La sfera raggiunge una velocità limite di 5.00 cm/s. Determinare la costante di tempo τ e l'istante in cui la sfera raggiunge il 90.0% della sua velocità limite.

SOLUZIONE

Concettualizzazione Con l'aiuto della Figura 5.13 immagina di lasciare cadere una sfera in olio e di osservarla mentre affonda verso il fondo del contenitore. Se hai dello shampoo denso in un contenitore trasparente, lasca cadere una pallina di vetro in esso ed osservane il moto.

Classificazione La sfera può essere descritta con il modello di una particella che cade sotto l'azione di una forza risultante diversa da zero, che comprende una forza di trascinamento viscoso dipendente dalla velocità della sfera.

Analisi Poiché la velocità limite è data da $v_L = mg/b$, il coefficiente b è dato da

$$b = \frac{mg}{v_L} = \frac{(2.00 \text{ g})(980 \text{ cm/s}^2)}{5.00 \text{ cm/s}} = 392 \text{ g/s}$$

Quindi, la costante di tempo τ è

$$\tau = \frac{m}{b} = \frac{2.00 \text{ g}}{392 \text{ g/s}} = 5.10 \times 10^{-3} \text{ s}$$

Determiniamo il tempo impiegato dalla sfera per raggiungere 0.900 v_L imponendo $v = 0.900v_L$ nell'Equazione 5.6 e risolvendo rispetto a t :

$$0.900v_L = v_L(1 - e^{-t/\tau})$$

$$1 - e^{-t/\tau} = 0.900$$

$$e^{-t/\tau} = 0.100$$

$$-\frac{t}{\tau} = \ln(0.100) = -2.30$$

$$t = 2.30\tau = 2.30(5.10 \times 10^{-3} \text{ s}) = 11.7 \times 10^{-3} \text{ s}$$

$$= 11.7 \text{ ms}$$

Conclusione La sfera raggiunge il 90% della sua velocità limite in un intervallo di tempo molto breve. Potresti aver osservato questo comportamento anche nell'esperienza con le palline di vetro e lo shampoo. A causa del breve intervallo di tempo necessario per raggiungere la velocità limite, potresti non aver avuto tempo di accorgerti della sua esistenza. All'apparenza, le palline potrebbero avere iniziato a muoversi fin da subito a velocità costante.

Modello 2: forza d'attrito proporzionale al quadrato della velocità dell'oggetto

Per oggetti di grandi dimensioni che si muovono nell'aria con velocità elevate come gli aerei, i paracadutisti, e le palle da baseball, il modulo della forza di attrito è approssimativamente proporzionale al quadrato della velocità:

$$R = \frac{1}{2}D\rho Av^2 \quad (5.7)$$

dove ρ è la densità dell'aria, A è l'area della sezione dell'oggetto in moto, misurata in un piano perpendicolare alla sua velocità, e D è una grandezza adimensionale determinata empiricamente, nota come *coefficiente di resistenza*. Il coefficiente di resistenza ha un valore di circa 0.5 per oggetti di forma sferica ma può assumere valori prossimi a 2 per oggetti aventi forme irregolari.

Consideriamo un aeroplano in volo che sia sottoposto a una tale forza di attrito. L'Equazione 5.7 mostra che la forza di attrito è proporzionale alla densità dell'aria e quindi diminuisce al diminuire della densità. Poiché all'aumentare dell'altitudine diminuisce la densità dell'aria, la forza di attrito che agisce su un aereo a reazione che vola a una data velocità deve anche diminuire con l'aumentare dell'altezza. Quindi, gli aerei tendono a volare a notevoli altezze per avvantaggiarsi della ridotta forza di attrito. Ciò consente di volare più rapidamente per una data spinta del motore. Naturalmente, questa elevata velocità provoca un aumento della forza di attrito in proporzione al quadrato della velocità stessa, cosicché si raggiunge un compromesso fra risparmio di carburante ed alta velocità.

Analizziamo, adesso, il moto di un oggetto in caduta libera, su cui agisce una forza di attrito, dovuta all'aria, diretta verso l'alto e di modulo dato dall'Equazione 5.7. Supponiamo che un oggetto di massa m sia lasciato cadere da fermo da una quota $y = 0$, come in Figura 5.14. Sull'oggetto agiscono due forze esterne: la forza

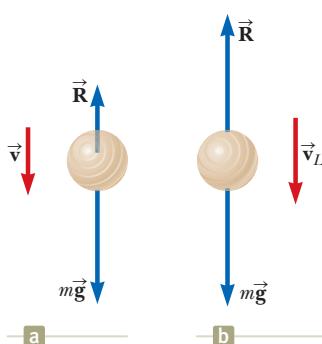


Figura 5.14 (a) Un oggetto che sta cadendo in aria è sottoposto ad una forza di trascinamento viscoso \vec{R} ed una forza gravitazionale $\vec{F}_g = m\vec{g}$. (b) L'oggetto raggiunge la sua velocità limite quando la forza risultante è nulla, ovvero quando $\vec{R} = -\vec{F}_g$ oppure $R = mg$. Prima che questo accada, l'accelerazione varia con la velocità secondo l'Equazione 5.9.

TABELLA 5.2 | Velocità limite per vari oggetti che cadono in aria

Oggetto	Massa (kg)	Sezione trasversa (m ²)	v_L (m/s) ^a
Surfista dell'aria	75	0.70	60
Palla da baseball (raggio 3.7 cm)	0.145	4.2×10^{-3}	33
Palla da golf (raggio 2.1 cm)	0.046	1.4×10^{-3}	32
Chicco di grandine (raggio 0.50 cm)	4.8×10^{-4}	7.9×10^{-5}	14
Goccia di pioggia (raggio 0.20 cm)	3.4×10^{-5}	1.3×10^{-5}	9.0

^a Il coefficiente di trascinamento D è assunto pari a 0.5 per tutti i casi.

di gravità, $m\vec{g}$, rivolta verso il basso, e la forza di attrito, \vec{R} , rivolta verso l'alto. Quindi, usando la seconda legge di Newton,

$$\sum F = ma \rightarrow mg - \frac{1}{2}D\rho Av^2 = ma \quad (5.8)$$

Risolvendo rispetto ad a , si trova che l'oggetto possiede un'accelerazione, rivolta verso il basso, di modulo

$$a = g - \left(\frac{D\rho A}{2m}\right)v^2 \quad (5.9)$$

Poiché $a = dv/dt$, questa è un'altra equazione differenziale che ci fornisce la velocità in funzione del tempo.

Ancora una volta si può calcolare la velocità limite, v_L , considerando che quando la forza di gravità è equilibrata dalla forza di attrito, la forza risultante è nulla e quindi l'accelerazione vale zero. Ponendo $a = 0$ nell'Equazione 5.9 si ha

$$g - \left(\frac{D\rho A}{2m}\right)v_L^2 = 0$$

$$v_L = \sqrt{\frac{2mg}{D\rho A}} \quad (5.10)$$

La Tabella 5.2 riporta le velocità limite per alcuni oggetti che cadono nell'aria, tutte calcolate nell'assunzione che il coefficiente di trascinamento sia 0.5.

QUIZ RAPIDO 5.6

Consideriamo un surfista dell'aria in caduta, come in Figura 5.15, prima che raggiunga la sua velocità limite. Mentre la velocità del surfista aumenta, il modulo dell'accelerazione (**a**) rimane costante, (**b**) diminuisce fino a raggiungere un valore costante diverso da zero, oppure (**c**) diminuisce fino a raggiungere zero?

Ulteriori approfondimenti in e-book: Paragrafo E5.2 Collegamento al contesto: coefficienti di resistenza delle automobili.



© 2011 Oliver Furrer/Jupiterimages Corporation

▲ **Figura 5.15** (Quiz rapido 5.6)
Un surfista del cielo sfrutta la forza verso l'alto prodotta dall'aria sulla sua tavola.

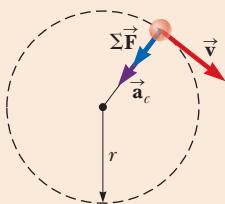
RIEPILOGO

Le forze d'attrito sono complicate, ma noi costruiamo un modello semplificato per l'attrito che ci permette di analizzare il moto includendone gli effetti. La **massima forza di attrito statico**, $f_{s,\max}$ tra due superfici è proporzionale alla forza normale che agisce sulle superfici. Questa forza massima si manifesta quando il corpo si trova sul punto di scivolare. In generale, $f_s \leq \mu_s n$, dove μ_s è il **coefficiente di attrito statico** ed n è il modulo della forza normale. Quando un corpo scivola su una superficie scabra, la **forza di attrito dinamico** \vec{f}_d è diretta in verso opposto alla velocità del corpo relativa alla superficie ed il suo modulo è propor-

zionale al modulo della forza normale agente sul corpo. Il modulo di questa forza è dato da $f_d = \mu_d n$, dove μ_d è il **coefficiente di attrito dinamico**. Generalmente, $\mu_d < \mu_s$.

Un corpo che si muove in un liquido o in un gas subisce una **forza di attrito** che dipende dalla velocità. Questa forza, che si oppone al moto, in generale aumenta con la velocità. La forza dipende dalla forma del corpo e dalle proprietà del mezzo in cui il corpo si muove. Per un corpo che cade esiste una condizione asintotica, quando la forza di attrito è uguale al peso ($a = 0$); in tal caso, il corpo raggiunge la sua **velocità limite**.

MODelli PER LA RISOLUZIONE DEI PROBLEMI

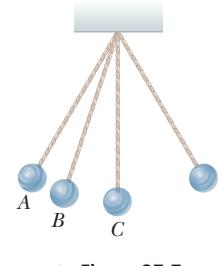


Particella in moto circolare uniforme (estensione) Con le nuove conoscenze acquisite sulle forze, possiamo ora estendere il modello di una particella in moto circolare uniforme, introdotto dapprima nel Capitolo 3. La seconda legge di Newton, applicata a una particella che si muove di moto circolare uniforme, afferma che la forza totale che agisce nella direzione radiale verso l'interno (Eq. 3.17) deve essere uguale al prodotto della massa per l'accelerazione centripeta:

$$\sum F = ma_c = m \frac{v^2}{r} \quad (5.3)$$

QUESITI

- Uno studente curioso, che si trova su di un aereo, prima di decollare appende il suo iPod per il cavo dell'auricolare. L'iPod rimane appeso in posizione verticale mentre l'aereo è fermo in attesa del decollo. L'aereo quindi aumenta rapidamente la sua velocità durante la fase di decollo sulla pista. (i) Relativamente alla mano dello studente, l'iPod: (a) si sposta verso la prua dell'aereo, (b) permane nella sua posizione verso il basso o (c) si sposta verso la coda dell'aereo? (ii) La velocità dell'aereo aumenta costantemente in un periodo di tempo di diversi secondi. Durante questo intervallo di tempo l'angolo formato dal cavo dell'auricolare con la verticale (a) aumenta, (b) rimane costante o (c) diminuisce?
- Una cassa rimane ferma dopo essere stata posta su di uno scivolo inclinato rispetto all'orizzontale. Quale delle seguenti affermazioni è corretta circa l'entità della forza di attrito che agisce sulla cassa? Scegli tutte quelle che sono vere. (a) È maggiore del peso della cassa. (b) È pari a $\mu_s n$. (c) È maggiore della componente della forza di gravità lungo la direzione del piano inclinato. (d) È uguale alla componente della forza di gravità lungo la direzione del piano inclinato. (e) È inferiore alla componente della forza di gravità lungo la direzione del piano inclinato.
- Una cassa di massa m è posta sul pianale di un camion senza essere assicurata in modo solidale ad esso. Quando il camion accelera in avanti con accelerazione a , la cassa rimane ferma rispetto al camion. Quale forza provoca l'accelerazione della cassa? (a) La forza normale. (b) La forza di gravità. (c) La forza d'attrito. (d) La forza ma esercitata dalla cassa. (e) Nessuna forza è necessaria.
- Un oggetto di massa m si muove con accelerazione \vec{a} lungo un piano inclinato dotato di attrito. Quali delle seguenti forze dovrebbero comparire in un diagramma di corpo libero dell'oggetto? Scegli tutte le risposte corrette. (a) La forza di gravità esercitata dal pianeta. (b) $m\vec{a}$ nella direzione del moto. (c) La forza normale esercitata dal piano inclinato. (d) L'attrito esercitato dal piano inclinato. (e) La forza esercitata dall'oggetto sul piano inclinato.
- Un pendolo consiste di un oggetto di piccole dimensioni appeso ad un sottile filo inestensibile la cui estremità superiore è fissata come in Figura Q5.5. Il corpo si muove senza attrito, oscillando in maniera simmetrica. Esso si muove, a partire dal punto di inversione A , passando per B fino a raggiungere la massima velocità nel punto C . (a) Di questi punti ve ne è uno per il quale il corpo ha accelerazione radiale non nulla e accelerazione tangenziale nulla? Se sì, quale? Qual è la direzione dell'accelerazione totale in questo punto? (b) Tra questi punti ce n'è uno per il quale il corpo ha accelerazione tangenziale non nulla e accelerazione radiale nulla? Se sì, quale? Qual è la direzione dell'accelerazione totale in questo punto? (c) C'è un punto nel quale il corpo non ha accelerazione? Se sì, quale? (d) C'è un punto nel quale il corpo ha sia accelerazione radiale che tangenziale nulle? Se sì, quale? Qual è la direzione dell'accelerazione totale in questo punto?
- Una porta all'interno di un ospedale è dotata di un sistema di chiusura pneumatico, in grado di fare muovere la porta in



▲ Figura Q5.5

- modo tale che la maniglia si muova con velocità costante per la maggior parte del suo moto. Durante questa fase del moto, (a) la maniglia è sottoposta ad un'accelerazione centripeta? (b) È sottoposta ad un'accelerazione tangenziale?
7. Un bambino si sta esercitando per una gara di BMX. La sua velocità rimane costante mentre percorre in senso antiorario il tracciato composto da due tratti rettilinei e due tratti semicircolari, come mostrato in Figura Q5.7. (a) Metti in ordine decrescente le accelerazioni nei punti A, B, C, D ed E. (b) Quali sono le direzioni delle velocità nei punti A, B e

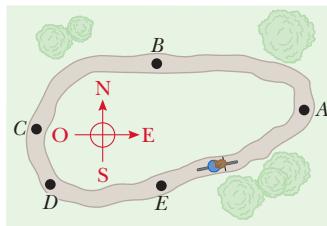


Figura Q5.7

DOMANDE CONCETTUALI

1. Descrivi la traiettoria di un corpo nel caso in cui (a) la sua accelerazione sia costante in modulo e perpendicolare alla velocità e (b) la sua accelerazione sia costante in modulo e parallela alla velocità.
2. Fare due esempi di casi in cui la forza di attrito sia parallela e con lo stesso verso del moto dell'oggetto.
3. Supponi di guidare un'auto di tipo tradizionale. Perché dovrasti evitare di premere troppo sui freni per fermarti nel più breve spazio possibile? (Molte auto moderne hanno un dispositivo antibloccaggio dei freni per evitare questo problema.)
4. Un secchio d'acqua può essere fatto ruotare lungo un percorso verticale senza che se ne versi. Perché l'acqua rimane nel secchio anche quando si trova sopra la tua testa?
5. Un corpo compie un moto circolare con velocità costante in modulo ogni volta che una forza risultante di modulo costante agisce perpendicolarmente alla velocità. Cosa accade alla velocità se la forza non è ad essa perpendicolare?
6. Un paracadutista raggiunge la sua velocità limite con il suo paracadute chiuso. Dopo che il paracadute è stato aperto,

C? Per ciascuno dei punti scegli tra nord, sud, est, ovest o inesistente. (c) Quali sono le direzioni dell'accelerazione nei punti A, B e C?

8. La porta di un ufficio viene spinta bruscamente e si apre spingendo contro un dispositivo pneumatico che rallenta la porta e quindi ne inverte il moto. Nel punto di massima apertura della porta (a) la maniglia ha un'accelerazione centripeta? (b) Ha un'accelerazione tangenziale?
9. Mentre una goccia d'acqua cade nell'atmosfera, la sua velocità inizialmente cresce mentre si muove verso la Terra. Prima che la goccia raggiunga la sua velocità limite, il modulo dell'accelerazione (a) aumenta, (b) diminuisce, (c) rimane costante a zero, (d) rimane costante a 9.8 m/s^2 oppure (e) rimane costante a qualche altro valore?

Ulteriori approfondimenti in e-book: Quesiti di approfondimento.

quali parametri cambiano per provocare la diminuzione della velocità limite?

7. Un'auto che si muove lentamente in avanti aumenta la sua velocità. Uno studente sostiene che "l'auto esercita una forza su se stessa" o che "il motore esercita una forza sull'auto". (a) Deduci che quest'idea non può essere corretta e che l'attrito esercitato dalla strada sia in realtà la forza propulsiva sull'auto. Rendi il tuo ragionamento e le prove che porti il più convincente possibile. (b) Si tratta di attrito statico o dinamico? Suggerimenti: considera una strada ricoperta di ghiaia fine. Considera l'impronta nitida del battistrada su di una strada asfaltata ottenuta ricoprendo il battistrada con della polvere.
8. È stato proposto che cilindri rotanti di 20 km di lunghezza e 8 km di diametro possano essere posizionati nello spazio ed utilizzati come colonie. Lo scopo della rotazione è quello di simulare la gravità per gli abitanti. Spiega come questa idea produca una efficace imitazione della gravità.

Ulteriori approfondimenti in e-book: Domande concettuali di approfondimento.

PROBLEMI

BIO indica problemi biomedici

indica problemi in cui sono richiesti sia ragionamenti simbolici che il calcolo di valori numerici

Ulteriori approfondimenti in e-book: Problemi di approfondimento.

Paragrafo 5.1 Forze di attrito

1. Un blocco di 25.0 kg è inizialmente in quiete su una superficie orizzontale scabra. Una forza orizzontale di 75.0 N è necessaria per mettere in moto il blocco. Una volta in movimento, si richiede una forza orizzontale di 60.0 N per mantenere il blocco in moto con velocità costante. Da

questa informazione determinare i coefficienti di attrito (a) statico e (b) dinamico tra l'oggetto e la superficie.

2. Per determinare i coefficienti di attrito fra la gomma e le diverse superfici, uno studente adopera una gomma per cancellare e un piano inclinato. In un esperimento la gomma per cancellare inizia a scivolare quando l'angolo di in-

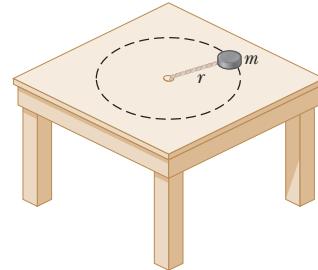
clinazione è di 36.0° per muoversi quindi verso il basso lungo il piano inclinato con velocità costante quando l'angolo viene ridotto a 30.0° . Da questi dati, determinare i coefficienti di attrito statico e dinamico per questo esperimento.

3. Si consideri un camion di grandi dimensioni che trasporta un carico pesante, come barre d'acciaio. Un pericolo grave per il conducente è il possibile slittamento in avanti del carico, con possibile distruzione della cabina, qualora il camion si fermasse bruscamente a causa di un incidente o di una brusca frenata. Si assuma, per esempio, che un carico di 10 000 kg sia posto sul pianale di un camion da 20 000 kg che procede a 12.0 m/s. Si assuma che il carico non sia legato sul pianale e si assuma che il coefficiente d'attrito fra il carico e il pianale sia 0.500. (a) Calcolare la minima distanza per fermare il camion senza che il carico scivoli in avanti. (b) Vi è qualche dato non necessario alla soluzione?
4. **Problema di ricapitolazione.** Un'auto sta viaggiando alla velocità di 50.0 km/h su un tratto pianeggiante di autostrada. (a) Se il coefficiente di attrito statico tra la strada e gli pneumatici in una giornata piovosa è 0.100, quale sarà la distanza di arresto dell'auto? (b) Quale sarebbe la distanza di arresto se la superficie fosse asciutta e $\mu_s = 0.600$?
5. *Perché la seguente situazione è impossibile?* Il tuo libro di fisica, del peso di 3.80 kg, è appoggiato di fianco a te sul sedile della tua auto. Il coefficiente di attrito statico tra il libro ed il sedile è 0.650, mentre il coefficiente di attrito dinamico è 0.550. Stai viaggiando in avanti alla velocità di 72.0 km/h e freni con accelerazione costante fino ad arrestarti dopo avere percorso una distanza di 30.0 m. Il tuo libro di fisica rimane sul sedile di fianco a te, invece di scivolare in avanti sul pavimento.

Paragrafo 5.2 Particella in moto circolare uniforme

6. Ogni qual volta due astronauti della missione *Apollo* si trovavano sulla superficie della Luna, un terzo astronauta si trovava in orbita attorno ad essa. Si assuma che l'orbita sia circolare e si trovi 100 km al di sopra della superficie della Luna, dove l'accelerazione di gravità è pari a 1.52 m/s^2 . Il raggio della Luna è di $1.70 \times 10^6 \text{ m}$. Determinare (a) la velocità orbitale dell'astronauta e (b) il periodo dell'orbita.
7. Una corda sottile riesce a sostenere un carico stazionario di 25.0 kg prima di spezzarsi. Un oggetto, la cui massa è $m = 3.00 \text{ kg}$ è legato alla corda e ruota lungo una circonferenza di raggio $r = 0.800 \text{ m}$ su un tavolo orizzontale privo di attrito. L'altra estremità della corda è fissata come in Figura P5.7. Quali valori di velocità può raggiungere l'oggetto prima che la corda si spezzi?

8. Nel modello di Bohr dell'atomo di idrogeno, un elettrone ruota su una traiettoria circolare attorno ad un protone. La velocità dell'elettrone è approssimativamente $2.20 \times 10^6 \text{ m/s}$. Trovare (a) la forza agente sull'elettrone quando esso ruota su un'orbita circolare di raggio $0.530 \times 10^{-10} \text{ m}$ e (b) l'accelerazione centripeta dell'elettrone.



▲ Figura P5.7

9. Disturbato dalle automobili che passavano a velocità elevata davanti al suo luogo di lavoro, il premio Nobel Arthur Holly Compton progettò un dosso (detto la "gobba di Holly") e lo fece installare. Supponi che un'auto del peso di 1 800 kg passi sopra la gobba, la cui forma segue un arco di cerchio di raggio 20.4 m, come mostrato in Figura P5.9. (a) Se l'auto viaggia a 30 km/h, quale forza viene esercitata dalla strada sull'auto quando essa passa per il punto più alto della gobba? (b) **E se?** Quale sarà la massima velocità con cui l'auto può passare per il punto più alto senza perdere contatto con la strada?



▲ Figura P5.9

10. **Problema di ricapitolazione.** (a) Stimare la velocità limite di una sferetta di legno (densità 0.830 g/cm^3) che cade in aria, assumendo che il suo raggio sia 8.00 cm ed il coefficiente di attrito sia 0.5. (b) Da che altezza dovrebbe cadere un oggetto in caduta libera, in assenza di attrito dell'aria, per raggiungere questa stessa velocità?

Fondamenti di Fisica

di Serway-Jewett

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**.

