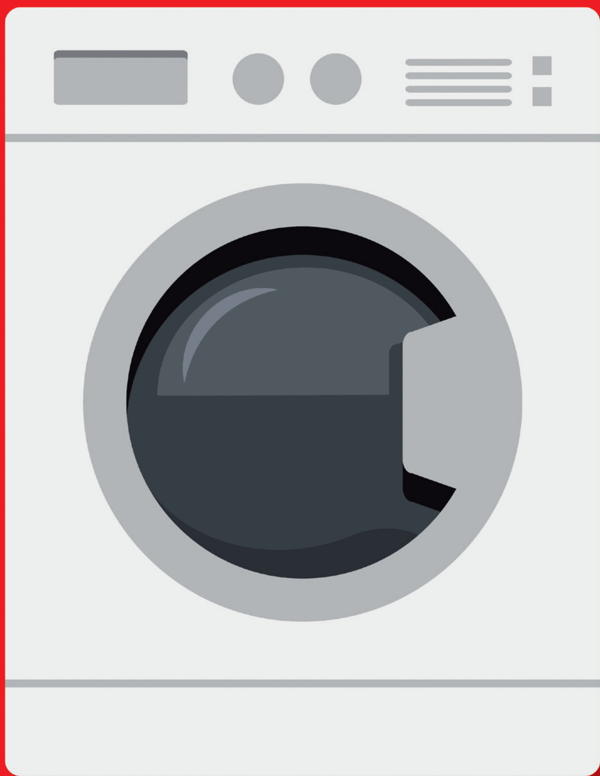
Douglas C. Giancoli

Fisica 1

Meccanica · Onde · Termodinamica

Terza edizione



cea
casa editrice ambrosiana

Douglas C. Giancoli

Fisica 1

Meccanica · Onde · Termodinamica

Terza edizione

a cura di Stefano Ossicini

Se vuoi accedere alle risorse online riservate

1. Vai su **my.zanichelli.it**
2. Clicca su *Registrati*.
3. Scegli *Studente*.
4. Segui i passaggi richiesti per la registrazione.
5. Riceverai un'email: clicca sul link per completare la registrazione.
6. Cerca il tuo codice di attivazione stampato in verticale sul bollino argentato in questa pagina.
7. Inseriscilo nella tua area personale su **my.zanichelli.it**

Se sei già registrato, per accedere ai contenuti riservati ti serve solo il codice di attivazione.

cea
casa editrice ambrosiana

Titolo originale: *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics* (Chapters 1–20), 5th Edition by Douglas C. Giancoli

Traduzione: Stefano Ossicini

Realizzazione editoriale: Epitesto, Milano

Copertina:
- *progetto grafico*: Anchora, Milano
- *realizzazione*: Sara Travella/GALLINE A POIS, Milano
- *immagine di copertina*: © Makhbubakhon Ismatova/iStockphoto

Prima edizione italiana: gennaio 1991
Seconda edizione italiana: gennaio 2010
Terza edizione italiana: novembre 2022

Ristampa: **prima tiratura**

5 4 3 2 1 2022 2023 2024 2025 2026

Realizzare un libro è un'operazione complessa, che richiede numerosi controlli: sul testo, sulle immagini e sulle relazioni che si stabiliscono tra loro. L'esperienza suggerisce che è praticamente impossibile pubblicare un libro privo di errori. Saremo quindi grati ai lettori che vorranno segnalarceli.

Per segnalazioni o suggerimenti relativi a questo libro rivolgersi a: CEA – Casa Editrice Ambrosiana
viale Romagna 5, 20089 Rozzano (MI)
fax 02 52202260 e-mail: **segreteria_cea@ceaedizioni.it**

Stampa: Grafica Ragno
Via Lombardia 25, 40064 Tolara di Sotto, Ozzano Emilia (Bologna)
per conto di Zanichelli editore S.p.A.
Via Irnerio 34, 40126 Bologna

Indice generale

Indice delle applicazioni VIII
Prefazione XI
Note sull'uso dei colori XIV

1 Introduzione, misure, stime 1

1.1 Come funziona la scienza 2
1.2 Modelli, teorie e leggi 3
1.3 Misure ed errori; cifre significative 4
1.4 Unità di misura, campioni e Sistema Internazionale (SI) 7
1.5 Conversione delle unità di misura 11
1.6 Ordine di grandezza; stima rapida 13
*1.7 Dimensioni e analisi dimensionale 17
Sommario 19
Quesiti 19
Quesiti e convinzioni errate 20
Problemi 20
Problemi generali 23

2 Moto: cinematica in una dimensione 25

2.1 Sistemi di riferimento e spostamento 26
2.2 Velocità media 27
2.3 Velocità istantanea 30
2.4 Accelerazione 33
2.5 Moto uniformemente accelerato 37
2.6 Risolvere i problemi 40
■ Guida alla risoluzione dei problemi 41
2.7 Oggetti in caduta libera 45
*2.8 Accelerazione variabile: calcolo integrale 53
Sommario 55
Quesiti 55
Quesiti e convinzioni errate 56
Problemi 57
Problemi generali 63

3 Cinematica in due o tre dimensioni; vettori 67

3.1 Vettori e scalari 68
3.2 Somma di vettori: metodo grafico 68
3.3 Sottrazione di vettori, prodotto per uno scalare 71
3.4 Somma di vettori mediante le componenti 71
■ Guida alla risoluzione dei problemi *Somma di vettori* 75
3.5 Versori 76
3.6 Cinematica con i vettori 77
3.7 Moto dei proiettili 81
3.8 Risoluzione dei problemi sul moto dei proiettili 83
■ Guida alla risoluzione dei problemi *Moto dei proiettili* 84
3.9 Velocità relativa 91
Sommario 94
Quesiti 95
Quesiti e convinzioni errate 96
Problemi 97
Problemi generali 103

4 Dinamica: le leggi di Newton 107

4.1 La forza 108
4.2 Primo principio della dinamica 108
4.3 La massa 110
4.4 Secondo principio della dinamica 110
4.5 Terzo principio della dinamica 114
4.6 Il peso e la forza di gravità; la forza normale 118
4.7 Risoluzione dei problemi con i principi della dinamica: diagrammi di corpo libero 121
■ Guida alla risoluzione dei problemi *Principi della dinamica; diagrammi di corpo libero* 123

 ISBN 978-88-08-29994-9

4.8 Soluzione dei problemi: un approccio generale 131

■ Guida alla risoluzione dei problemi *In generale* 131

Sommario 132
Quesiti 132
Quesiti e convinzioni errate 133
Problemi 135
Problemi generali 141

5 Applicazioni delle leggi di Newton: attrito, moto circolare, viscosità 145

5.1 Applicazioni delle leggi di Newton in presenza di attrito 145
5.2 Moto circolare uniforme: cinematica 154
5.3 Moto circolare uniforme: dinamica 159

■ Guida alla risoluzione dei problemi *Moto circolare uniforme* 162

5.4 Curve su strada: piane e inclinate 163
5.5 Moto circolare non uniforme 167
*5.6 Forze dipendenti dalla velocità: resistenza e velocità limite 168

Sommario 171
Quesiti 171
Quesiti e convinzioni errate 172
Problemi 173
Problemi generali 179

6 Gravitazione e sintesi di Newton 183

6.1 Legge di gravitazione universale di Newton 184
6.2 Formulazione vettoriale della legge di gravitazione universale di Newton 188
6.3 La gravità vicino alla superficie terrestre; applicazioni in geofisica 188
6.4 Moto dei satelliti e assenza di peso 191
6.5 Pianeti, leggi di Keplero e sintesi newtoniana 195
6.6 La Luna sorge ogni giorno un'ora dopo 202
6.7 Tipi di forze in natura 203
*6.8 Campo gravitazionale 203
*6.9 Principio di equivalenza; curvatura dello spazio; buchi neri 204

Sommario 206
Quesiti 206
Quesiti e convinzioni errate 207
Problemi 208
Problemi generali 212

7 Lavoro ed energia 215

7.1 Lavoro di una forza costante 216

■ Guida alla risoluzione dei problemi *Lavoro* 218

7.2 Prodotto scalare di due vettori 220
7.3 Lavoro di una forza variabile 222
7.4 Energia cinetica e teorema dell'energia cinetica 226

Sommario 231
Quesiti 232
Quesiti e convinzioni errate 232
Problemi 233
Problemi generali 237

8 Conservazione dell'energia 241

8.1 Forze conservative e non conservative 242
8.2 Energia potenziale 244
8.3 Energia meccanica e sua conservazione 248
8.4 Principio di conservazione dell'energia meccanica nella risoluzione dei problemi 250
8.5 Principio di conservazione dell'energia 258
8.6 Conservazione dell'energia in presenza di forze dissipative: guida alla risoluzione dei problemi 259

■ Guida alla risoluzione dei problemi *Conservazione dell'energia* 261

8.7 Energia potenziale gravitazionale e velocità di fuga 263
8.8 Potenza 266
8.9 Diagrammi dell'energia potenziale; equilibrio stabile e instabile 269
8.10 Fionda gravitazionale 271 *

Sommario 273
Quesiti 273
Quesiti e convinzioni errate 275
Problemi 276
Problemi generali 281

9 Quantità di moto 285

9.1 La quantità di moto e la sua relazione con la forza 286
9.2 Conservazione della quantità di moto 288
9.3 Urti e impulso 293
9.4 Conservazione dell'energia e della quantità di moto negli urti 295
9.5 Urti elastici in una dimensione 296
9.6 Urti anelastici 300

9.7 Urti in due o tre dimensioni 302
Guida alla risoluzione dei problemi *Conservazione della quantità di moto e urti* 306
9.8 Centro di massa (CM) 306
9.9 Centro di massa e moto traslatorio 312
*9.10 Sistemi a massa variabile; razzo a propulsione 314
Sommario 318
Quesiti 318
Quesiti e convinzioni errate 320
Problemi 321
Problemi generali 327

10 Moto rotazionale 331

10.1 Grandezze angolari 332
10.2 Natura vettoriale delle grandezze angolari 338
10.3 Accelerazione angolare costante 339
10.4 Momento torcente o momento di una forza 340
10.5 Dinamica rotazionale: momento torcente e inerzia rotazionale 343
10.6 Guida alla risoluzione dei problemi di dinamica rotazionale 346
Guida alla risoluzione dei problemi *Moto rotazionale* 347
10.7 Calcolo dei momenti d'inerzia 350
10.8 Energia cinetica rotazionale 352
10.9 Rotazione più traslazione: il rotolamento 355
*10.10 Perché una sfera che rotola rallenta? [Aspetti trascurati] 363
Sommario 364
Quesiti 365
Quesiti e convinzioni errate 366
Problemi 368
Problemi generali 374

11 Momento angolare 379

11.1 Momento angolare: oggetti in rotazione intorno a un asse fisso 380
11.2 Prodotto vettoriale; natura vettoriale del momento delle forze 386
11.3 Momento angolare di una particella 388
11.4 Momento angolare e momento delle forze per un sistema di particelle: moto generale 389
11.5 Momento angolare e momento delle forze per un corpo rigido 392
11.6 Conservazione del momento angolare 396
*11.7 La trottola e il giroscopio 398
11.8 Sistemi di riferimento rotanti: forze d'inerzia 399
*11.9 Effetto Coriolis 401
Sommario 403
Quesiti 403
Quesiti e convinzioni errate 404
Problemi 405
Problemi generali 411

12 Equilibrio statico; elasticità e rotture 415

12.1 Condizioni per l'equilibrio 416
12.2 Come risolvere i problemi di statica 419
Guida alla risoluzione dei problemi *Statica* 419
*12.3 Applicazioni a muscoli e articolazioni 424
12.4 Stabilità ed equilibrio 427
12.5 Elasticità; sforzi e deformazioni 428
12.6 Rotture 432
*12.7 Capriate e ponti 434
*12.8 Archi e cupole 438
Sommario 441
Quesiti 441
Quesiti e convinzioni errate 442
Problemi 444
Problemi generali 450

13 Fluidi 455

13.1 Fasi della materia 456
13.2 Densità e densità relativa 456
13.3 Pressione nei fluidi 457
13.4 Pressione atmosferica e pressione relativa 462
13.5 Principio di Pascal 463
13.6 Misura della pressione: manometri e barometri 464
13.7 Spinta idrostatica e principio di Archimede 466
13.8 Fluidi in movimento: portata ed equazione di continuità 472
13.9 Equazione di Bernoulli 475
13.10 Applicazioni del principio di Bernoulli: Torricelli, aeroplani, palla con effetto, flusso sanguigno 477
13.11 Viscosità 480
*13.12 Flusso nei tubi: equazione di Poiseuille, flusso sanguigno 481

 ISBN 978-88-08-29994-9

*13.13 Tensione superficiale e capillarità 482
13.14 Le pompe e il cuore 484
Sommario 485
Quesiti 486
Quesiti e convinzioni errate 487
Problemi 488
Problemi generali 493

14 Oscillazioni 497

14.1 Oscillazioni di una molla 498
14.2 Moto armonico semplice 500
14.3 Energia nell'oscillatore armonico semplice 508
14.4 Relazione tra moto armonico semplice e moto circolare uniforme 511
14.5 Pendolo semplice 512
*14.6 Pendolo fisico e pendolo di torsione 514
14.7 Moto armonico smorzato 516
14.8 Oscillazioni forzate e risonanza 520
Sommario 522
Quesiti 523
Quesiti e convinzioni errate 524
Problemi 525
Problemi generali 530

15 Moto ondulatorio 533

15.1 Caratteristiche del moto ondulatorio 534
15.2 Tipi di onde: trasversali e longitudinali 536
15.3 Energia trasportata dalle onde 542
15.4 Rappresentazione matematica di un'onda viaggiante 544
*15.5 Equazione delle onde 547
15.6 Principio di sovrapposizione 549
15.7 Riflessione e trasmissione delle onde 550
15.8 Interferenza 552
15.9 Onde stazionarie e risonanza 553
15.10 Rifrazione 557
15.11 Diffrazione 559
Sommario 560
Quesiti 561
Quesiti e convinzioni errate 562
Problemi 563
Problemi generali 567

16 Suono 571

16.1 Caratteristiche del suono 572
16.2 Rappresentazione matematica delle onde longitudinali 574
16.3 Intensità del suono: il decibel 575
16.4 Sorgenti sonore: corde vibranti e colonne d'aria 581
*16.5 Qualità del suono e rumore: sovrapposizione 587
16.6 Interferenza di onde sonore e battimenti 588
16.7 Effetto Doppler 591
*16.8 Onde d'urto e *bang* sonico 596
*16.9 Applicazioni: sonar, ultrasuoni e ricostruzione di immagini in medicina 598
Sommario 600
Quesiti 600
Quesiti e convinzioni errate 601
Problemi 602
Problemi generali 607

17 Temperatura, espansione termica e legge dei gas perfetti 611

17.1 Teoria atomica della materia 612
17.2 Temperatura e termometri 614
17.3 Equilibrio termico e principio zero della termodinamica 616
17.4 Dilatazione termica 617
*17.5 Sollecitazioni termiche 621
17.6 Leggi dei gas e temperatura assoluta 622
17.7 Legge dei gas perfetti (o gas ideali) 624
17.8 Guida alla risoluzione dei problemi sulla legge dei gas perfetti 626
17.9 Legge dei gas perfetti a livello molecolare: numero di Avogadro 628
*17.10 Scala di temperatura dei gas perfetti: uno standard 629
Sommario 630
Quesiti 631
Quesiti e convinzioni errate 632
Problemi 633
Problemi generali 636

18 Teoria cinetica dei gas 639

18.1 Legge dei gas perfetti e interpretazione molecolare della temperatura 639
18.2 Distribuzione delle velocità molecolari 645
18.3 Gas reali e variazioni di fase 647
18.4 Pressione di vapore e umidità 649
18.5 Diminuzione della temperatura di ebollizione dell'acqua con l'altitudine 652

18.6 Equazione di stato di van der Waals 653
18.7 Cammino libero medio 654
18.8 Diffusione 656
Sommario 659
Quesiti 659
Quesiti e convinzioni errate 660
Problemi 661
Problemi generali 664

19 Calore e primo principio della termodinamica 667

19.1 Calore come trasferimento di energia 668
19.2 Energia interna 669
19.3 Calore specifico 671
19.4 Calorimetria: risoluzione dei problemi 672
19.5 Calore latente 675
Guida alla risoluzione dei problemi *Calorimetria* 679
19.6 Primo principio della termodinamica 681
19.7 Trasformazioni termodinamiche e primo principio della termodinamica; calcolo del lavoro 683
19.8 Calori specifici molari dei gas ed equipartizione dell'energia 689
19.9 Espansione adiabatica di un gas 693
19.10 Trasmissione del calore: conduzione, convezione, irraggiamento 695
Sommario 704
Quesiti 705
Quesiti e convinzioni errate 706
Problemi 707
Problemi generali 712

20 Secondo principio della termodinamica 715

20.1 Secondo principio della termodinamica 715
20.2 Macchine termiche 717
20.3 Macchina di Carnot; trasformazioni reversibili e irreversibili 720
20.4 Frigoriferi, condizionatori d'aria e pompe di calore 725
20.5 Entropia 729
20.6 Entropia e secondo principio della termodinamica 731
20.7 Dall'ordine al disordine 736
20.8 Energia non disponibile; morte termica 737
20.9 Interpretazione statistica dell'entropia e secondo principio 738
*20.10 Temperatura termodinamica, terzo principio della termodinamica 741
20.11 Inquinamento termico, riscaldamento globale e risorse energetiche 741
Guida alla risoluzione dei problemi *Termodinamica* 744
Sommario 744
Quesiti 745
Quesiti e convinzioni errate 746
Problemi 747
Problemi generali 751

Appendici

A **Formule matematiche** A-1
B **Derivate e integrali** A-7
C **Integrazione numerica** A-9
D **Ancora sull'analisi dimensionale** A-12
E **Forza gravitazionale prodotta da una distribuzione di massa sferica** A-14
F **Isotopi selezionati** A-17

Fonti delle illustrazioni I-1
Indice analitico I-2
Tavole T-1

Indice delle applicazioni

L'asterisco indica le novità di questa edizione.

Capitolo 1

Biologia e medicina

Attacco virale a una cellula 8
Battiti cardiaci durante la vita 16
Numero di nucleoni nel corpo umano 22
Capacità polmonare 24

Ingegneria, ambiente e vita quotidiana

Crollo di edifici 2
Gli "Ottomila" 11
Fare stime: il volume di un lago 14
Spessore di un foglio 15
Calcolo dell'altezza per triangolazione 15
Stima del raggio terrestre 16
Tecnica per stimare di Fermi 17
Polvere inquinante 22
GPS 23
Chip per computer 23

Capitolo 2

Ingegneria, ambiente e vita quotidiana

Progetto di una pista 39
*Tempo di gonfiaggio di un airbag 39
Distanza di frenata di un'automobile 42
CD: dimensione e frequenza dei bit 58, 66
*Baseball 60
Pallacanestro 61
Golf 64
Sistema di trasporto rapido 65

Capitolo 3

Ingegneria, ambiente e vita quotidiana

Lancio dall'elicottero 67, 90, 104
*Baseball 96, 104, 105
Pallacanestro 105
*Sport 67, 81, 85, 88, 95, 99, 103
Football 85, 88
Via di fuga per camion 99
Golf sulla Luna 103
Sport estremi 104

Capitolo 4

Biologia e medicina

Come possiamo camminare 92
Colpo di frusta 133
*Forza esercitata dal cuore 135

Ingegneria, ambiente e vita quotidiana

Razzo 85, 115, 136
Pattinatore si spinge via 115
Quale forza accelera una macchina 116
Pesi meno in un ascensore che scende 121
Hockey 122
Ascensore, disagio 127,136
Vantaggio meccanico, puleggia 128, 234
Accelerometro 128
*Sport 133, 135, 141
*Corda sospesa per orsi 134
Tiro alla fune 133
Incidente d'auto e *g* 135
Pinzette ottiche 136
*Funambolo 137
Istantanea di pallacanestro 137
Scalatore 138, 143, 144
Via di fuga per camion 139
Pianificazione urbana, macchine in collina 141
Andare in bicicletta 141, 143
Progettazione della rampa di un supermercato 142
Asteroide 142
*Macchina impantanata nel fango 144

Capitolo 5

Biologia e medicina

Centrifugazione 158

Ingegneria, ambiente e vita quotidiana

Sciare 145, 151, 171
Spingere o tirare una slitta? 150
Velocità di uno sciatore in aria e sulla neve 151
*Simulare la gravità 158, 172, 178
*Arricchimento dell'uranio, reattori, bomba 159
Ruota panoramica 162
Percorrere una curva 163
Curve su strade inclinate 166
Attrito nello sci di fondo 171
Stazione spaziale rotante 172, 177
*Giostra rotante 172, 180
Inclinazione/virata di un aeroplano 171, 181
Su e giù sulle montagne russe 177
Automobile vola via dalla strada 178
Attrito della caduta massi 181

Capitolo 6

Biologia e medicina

Assenza di peso 193

Ingegneria, ambiente e vita quotidiana

*Astronauti in orbita 183, 195, 207
Gravità in montagne elevate 189
Ricerca di combustibili e minerali 190, 207, 210
Satelliti, navicelle spaziali 183, 191, 211
Satelliti geostazionari 192
Caduta libera per atleti 195
Pianeti 195, 209
*Maree oceaniche 200, 206, 213
Punti di Lagrange 201
*Orbita della Luna, periodi, fasi, diagramma 202, 211
*Eclissi 203
Spazio curvo 204
Buchi neri 206, 210
Nane bianche 209
Determinare la massa del Sole 209
Pianeti attorno alle stelle 209
Stazione spaziale rotante 210
Comete, asteroidi, lunedì 211, 212, 214
GPS 212
Via Lattea 214

Capitolo 7

Ingegneria, ambiente e vita quotidiana

Lanciatore di baseball 215
Distanza d'arresto di un'automobile 228
Leva 234
*Puleggia 234
Jet catapulta 236
Biciclette, corone (denti) 239
Corde estendibili da arrampicata 240

Capitolo 8

Biologia e medicina

Potenza per salire le scale 267
*ATP 270
Scavalcare tronchi 274

Ingegneria, ambiente e vita quotidiana

Salto con l'asta 241, 253, 235
Piste da sci alpino 241
Montagne russe 245, 251, 261
Velocità di fuga dalla Terra o dalla Luna 265
Potenza necessaria a un'automobile 288
Efficienza del motore 289
*Fionda gravitazionale 271, 281, 329
Salto in alto 276
Bungee jumping 277
Atterraggio di un modulo lunare 278
Velocità di fuga dal sistema solare 280
Trampolino per salto con gli sci 281
Salto in lungo 282

Capitolo 9

Biologia e medicina

Impulso nella caduta: fortuna? 323

Ingegneria, ambiente e vita quotidiana

Palle da biliardo 285, 289, 297, 303
Servizio nel tennis 287, 293
Propulsione di un razzo 292, 316
Rinculo del fucile 292
Colpo di karate 294
Reattori nucleari 299
Collisioni nucleari 298, 299, 302, 305
Pendolo balistico, misurare la velocità 323
Scoprire la distanza fra pianeti 314, 328
*Tempo di gonfiaggio di un airbag 311
Nastro trasportatore 317
Tiro alla fune 319
Autoscontri 327
Pericolo asteroide 328
Fionda gravitazionale 329
Forza esercitata dal vento 329
Bowling 329

Capitolo 10

Biologia e medicina

Acuità dell'occhio di un uccello 333
Centrifuga 339
*Bicipite, tricipite, momento torcente 342, 370
Alzarsi da terra 365
Mammiferi veloci 366

Ingegneria, ambiente e vita quotidiana

Ruote panoramiche 331, 334, 335
Estensione del ferro per pneumatici 341
Volano, energia 353, 378
Yo-Yo 360
Forze frenanti su un'automobile 362
Odometro della bicicletta 365
Funambolismo 366
*Eclissi solare totale 368
Momento torcente 369
Lancio del martello 372
Frequenza di rotazione di un CD 374
Cambi della bicicletta 375
Stecca da biliardo, palla che rotola 376
*Angolo di inclinazione della bicicletta 378

Capitolo 11

Ingegneria, ambiente e vita quotidiana

Pattinatori/tuffatori rotanti 379, 381, 413
Collasso di una stella di neutroni 383, 413
Rotazione strana della ruota di una bicicletta 385, 394
Bilanciamento della ruota di un'automobile 394
Trottola 398
Giroscopio 399
Uragani, cicloni, tifoni 402
*Clima anticiclonico 402
Precessione degli equinozi 410
Ribaltamento di un SUV 411
Punto dolce di una mazza da baseball 414

Capitolo 12

Biologia e medicina

*Forze nei muscoli e legamenti 424, 448
*Cosa può fare un atleta 425
*Forze sulla colonna vertebrale e mal di schiena 426
Equilibrio umano con carichi 428
*Fratture ossee 433, 449, 454

Ingegneria, ambiente e vita quotidiana

Crollo di edifici 416, 434
Edifici, statica 415, 441
Leve, vantaggio meccanico 418
Bilanciamento di un dondolo 419, 420
Trave a balzo 421
Rotture 432, 424
Tragico collasso 434
Capriate e ponti 434, 438
Architettura: archi e cupole 438, 441
*Forze in una cupola 440
*Corda sospesa per orsi 445

Capitolo 13

Biologia e medicina

Pressione nelle cellule 462
Flusso sanguigno 474, 479, 482
Sistema circolatorio umano 474
Attacco ischemico transitorio 479
*Flusso d'aria nelle tane sotterranee degli animali 480
Malattie cardiache, occlusione di un'arteria 482
Camminare sull'acqua, insetti 482
Cuore come pompa 484
*Misurare la pressione arteriosa 485
Trasfusione di sangue 493

Ingegneria, ambiente e vita quotidiana

Pressione in una fornitura d'acqua 460
Diminuzione della pressione atmosferica con l'altitudine 461
Altitudine alla quale la pressione atmosferica si dimezza 462
Trattenere con un dito l'acqua in una cannuccia 463
Ponte elevatore idraulico 464
Freni idraulici 464
Manometro 464
Barometro 465
Ventosa 466
Densimetro 470
Deriva dei continenti, tettonica a placche 471
*Cambiamento del livello di un lago, gettare un sasso in acqua 472, 486
Come si solleva un pallone pieno d'elio 471
Condotto di riscaldamento 474
Sistema di riscaldamento ad acqua calda 476
Nebulizzatore di profumo 478
Portata d'ala di un aeroplano 478
Vento di navigazione 478
Palla con effetto 479
Perché il fumo sale lungo il camino 480
Saponi e detersivi 483
Pompe 484
Sifone 486
Pressione idraulica 489
Uragano 491
Lancio di un razzo 492
Numero di Reynolds 493
Botte rotta da una sottile colonna d'acqua 495

Capitolo 14

Biologia e medicina

Oscillazione di una ragnatela 504
Gamba umana come pendolo 528

Ingegneria, ambiente e vita quotidiana

Ammortizzatore 497, 517
Vibrazioni indesiderate del pavimento 505
Altoparlante 506
*Orologio a pendolo 513, 524, 528
Geologia 514, 517
Misurare *g* in un pendolo 514
Ammortizzatori per terremoto 517
Bambino sull'altalena, risonanza 520
Danno da risonanza 520
Fattore Q 522, 529
Bungee jumping 526
*Metronomo 527
Camminata naturale 528
Oscillazione di edifici alti 530

 ISBN 978-88-08-29994-9

Capitolo 15

Biologia e medicina

Ecolocalizzazione di pipistrelli, delfini e balene 539

Ingegneria, ambiente e vita quotidiana

Onde acquatiche 533, 541
Onde sonore 536
Geologia 541, 561, 568
Onde sismiche 541, 543, 558, 563
Onda quadra 550
*Segnale del telefono 560
Curvatura delle onde radio AM e FM 562
Pesce e pescatore: riflessione interna 567
Riflessione sismica: prospezione di giacimenti 567
Versare il caffè 568
Tsunami 569

Capitolo 16

Biologia e medicina

Ampiezza dell'intervallo di intensità dell'udito umano 575
Sensibilità dell'udito 580
Pipistrelli ed effetto Doppler 595
Flusso a effetto Doppler 595, 609
Immagini mediche con ultrasuoni 598
*Immagine ecografica Doppler 599

Ingegneria, ambiente e vita quotidiana

Strumenti a corda 571, 581
Strumenti a fiato 571, 583
Corde del pianoforte 571, 582, 583
Distanza di un fulmine, secondi 572
Macchine fotografiche con autofocus 573
Risposta dell'altoparlante 577
Scala musicale 581
Chitarra, violino 581, 583, 600, 605
Canne d'organo 586
Accordatura con battimenti 590
Effetto Doppler nelle previsioni meteorologiche 596
*Pistole radar per la velocità 596
Spostamento verso il rosso 596
Bang sonico, barriera del suono 596, 606
Sonar: profondità marine, prove penetrometriche sulla Terra 597, 607
Rapporto segnale/rumore 603, 607
Orologio oscillatore al quarzo 604
Sensori di movimento 607
Guadagno audio 607

Capitolo 17

Biologia e medicina

Vita al di sotto del ghiaccio 620
Molecole contenute in un respiro 628, 637
Lunghezza dei boccagli 638

Ingegneria, ambiente e vita quotidiana

*Mongolfiere 611, 638
Giunti di espansione 614, 617, 622
I fori si espandono? 618
Aprire un barattolo 618
Traboccamento di un serbatoio di benzina 620
Deformazioni del manto autostradale 622
Bottiglia chiusa nel fuoco 624
Massa (peso) dell'aria in una stanza 627
Pressione in uno pneumatico caldo o freddo 627
Termostato 631
Vetro Pyrex 631
*Inaccuratezza di un metro a nastro 632, 636
Sub 635, 636
Busta di patatine che si gonfia 635

Capitolo 18

Biologia e medicina

Energia cinetica delle molecole nelle cellule 643
Umidità e benessere 651
Cromatografia 658
Diffusione negli organismi viventi 658, 664

Ingegneria, ambiente e vita quotidiana

Effetto della temperatura nelle reazioni chimiche 645
Raffreddamento da evaporazione 649
Umidità, meteo 651
*Abbassamento della temperatura di ebollizione con l'altitudine 652
Pentola a pressione 663

Capitolo 19

Biologia e medicina

Bruciare calorie 669
Misurare il contenuto di calore 675, 708
Evaporazione e temperatura corporea 680
Perdita di calore dal corpo per irraggiamento 700
Stanze confortevoli: aria fresca e pareti calde 701
Termografia medica 703
Evitare il congelamento delle piante 705
Mangiare la neve fa raffreddare 708
Conduzione di calore attraverso la pelle, capillari sanguigni 711
Assorbimento di energia della foglia 714
Metabolizzare il grasso 714

Ingegneria, ambiente e vita quotidiana

Mattonella fredda, tappeti caldi 696
Perdita di calore attraverso le finestre 697
Finestre termiche (doppio vetro) 697
Come isolano i vestiti 697
Valori *R* nell'isolamento termico 698
Correnti oceaniche e vento 698
Riscaldamento domestico per convezione 698
Vestiti chiari e vestiti scuri 700
Radiazione solare, stagioni 702
Astronomia – dimensioni di una stella 702
Imbottiture con piume d'oca 705
Bottiglia termica 705
Coperta d'emergenza 706
Particelle d'aria, meteo, tasso di intervallo adiabatico 711

Capitolo 20

Biologia e medicina

Evoluzione biologica, sviluppo 737
*Alberi che compensano CO_2 754

Ingegneria, ambiente e vita quotidiana

Motore a vapore 715, 717, 722, 752
Motore a combustione interna 717, 724
Efficienza di un motore 722
Frigoriferi, aria condizionata 725, 727, 748
Pompa di calore 727, 748
*Classificazione SEER 728
Inquinamento termico, clima 741
*Impronta ecologica 742
Risorse energetiche 743, 751
Energia solare, termica, eolica 743, 751
Motore diesel 753, 714
Ciclo Stirling 753,
Ciclo Brayton, turbina a gas 753
Deumidificatore 754

Prefazione

Novità!

1. **Quesiti e convinzioni errate**, in numero di 10 o 15 alla fine di ogni capitolo. I test a risposta multipla comprendono risposte errate e risposte corrette. Infatti, dal punto di vista dell'apprendimento, chiedere a chi studia di riflettere, di considerare le opzioni, si rivela più efficace che dirgli semplicemente cosa è giusto e cosa è sbagliato. (Si tratta di quesiti che si aggiungono alle domande di apertura del capitolo.)
2. **Assist gravitazionale** (fionda) al fine di aumentare la velocità dei veicoli spaziali (Capitolo 8).
3. Chiarimento, dal punto di vista didattico, di che cos'è l'**energia potenziale** e, in generale, l'energia (Capitolo 8) e di centinaia di altri argomenti.
4. Ogni giorno la **Luna** sorge un'ora dopo (Capitolo 6), fasi e periodi.
5. **Sistema ideale *vs.* sistema reale** e il grafico *PV* come un'approssimazione idealizzata di un processo reale (Capitolo 19).
6. **Arricchito con nuovi problemi**, nuove domande e quesiti e convinzioni errate (*vedi* sopra, punto 1).
7. Molti **nuovi esempi** concettuali.
8. **Più passaggi matematici** compresi nelle derivazioni e negli esempi.
9. **Stato** di un sistema e variabili di stato (Capitolo 17).
10. **Nuove unità di misura** del Sistema Internazionale (Capitolo 1, Tavole).
11. **Temperatura di ebollizione** dell'acqua *vs.* altitudine. (Capitolo 18).
12. La **fisica moderna** nei capitoli classici del volume (a volte nei Problemi): anni luce, universo osservabile (Capitolo 1); *optical tweezers* (Capitolo 4); uranio arricchito (Capitolo 5); buchi neri e spazio curvo, nane bianche (Capitolo 6); struttura cristallina (Capitolo 7); potenziale di Yukawa, potenziale di Lennard-Jones (Capitolo 8); neutroni, reattori nucleari, moderatore, collisioni nucleari, decadimento radioattivo, collasso e stelle di neutroni (Capitolo 9); spostamento verso il rosso della galassia (Capitolo 16); uranio e diffusione del gas (Capitolo 18).
13. **Secondo principio della termodinamica** e riorganizzazione dell'energia termica (Capitolo 20).
14. **Simmetria** ovunque.
15. **Arricchimento dell'uranio**, percentuale necessaria nei reattori e nelle bombe nucleari (Capitolo 5).
16. Una definizione più accurata di **mole**.
17. Ambiguità della **trasformazione di un gas** in un liquido sotto la temperatura critica.
18. La **misurazione** influisce sulla quantità misurata.
19. **Nuove applicazioni:**
    - Maree (Capitolo 6)
    - Anticiclone (Capitolo 11)
    - Forze nei muscoli e nelle articolazioni (Capitolo 12)
    - Immagini ecografiche Doppler (Capitolo 16)
    - Il livello del lago cambia quando un grande sasso viene lanciato dalla barca (Capitolo 13)
    - Velocità degli sciatori sulla neve rispetto a quando spiccano un volo in aria (Capitolo 5)
    - Il trasferimento di calore all'interno del corpo umano avviene per convezione (sangue) (Capitolo 19)
    - Misurazione della pressione arteriosa (Capitolo 13)
    - Sport (molti)
    - Impronta ecologica dell'anidride carbonica e cambiamento climatico (Capitolo 20)
    - Perché i boccagli sono corti (Capitolo 17)

Guardare il mondo con occhi che si intendono di fisica

Ho voluto scrivere un libro di testo diverso da tutti gli altri, che presentano la fisica come un insieme di fatti, quasi un catalogo. Invece di iniziare la trattazione in modo formale e dogmatico, ho cercato di introdurre ogni argomento con osservazioni ed esperienze della vita di tutti i giorni, partendo dalle peculiarità del mondo reale, per passare poi alle generalizzazioni e agli aspetti più formali della fisica, dimostrando perché crediamo in ciò in cui crediamo. Questo approccio rispecchia il modo in cui la scienza viene di fatto praticata.

L'obiettivo è quello di offrire a chi studia una conoscenza approfondita dei concetti base della fisica in tutti i suoi aspetti. Altrettando importante è mostrare quanto sia utile la fisica nella vita quotidiana e nella professione che si intraprenderà, presentando le sue applicazioni alla biologia, alla medicina, all'ingegneria e all'architettura, per citare solo alcuni ambiti.

 ISBN 978-88-08-29994-9

Molto impegno è stato dedicato a illustrare le tecniche che permettono di risolvere i problemi attraverso esempi concettuali e paragrafi specificatamente dedicati alle strategie di problem solving.

Il Capitolo 1 non è concepito per essere letto e poi subito dimenticato. In fisica è fondamentale essere consapevoli che ogni misura comporta un certo grado di incertezza e che occorre scrivere soltanto le cifre significative. Essere in grado di fare delle stime rapide si rivela un potente strumento utilizzato in tutto il libro, a partire dal primo capitolo (è possibile stimare il raggio della Terra!).

Per qualcuno la matematica può rappresentare un ostacolo. Così, ho cercato di includere tutti i passaggi. Importanti strumenti matematici, come la somma e il prodotto di vettori, sono introdotti nel testo laddove il contesto lo richiede e non in un capitolo introduttivo di ardua lettura. Nelle *Appendici* vengono presentati la matematica di base, derivate e integrali, oltre ad alcuni argomenti più complessi come l'integrazione numerica, il campo gravitazionale della distribuzione sferica di massa e una tabella che riporta alcuni isotopi nucleari (accuratamente aggiornati, così come lo sono la tavola periodica e le costanti fondamentali riportate nelle *Tavole* in fondo al libro).

Il volume affronta senza dubbio più argomenti di quelli che possono essere trattati nei singoli corsi universitari, offrendo una grande flessibilità. Le sezioni contrassegnate con un asterisco (*) si possono considerare facoltative, poiché presentano temi più complessi o argomenti solitamente non trattati. In un corso breve si può pensare di eliminare tutto il materiale facoltativo, così come gran parte dei Capitoli 13 e 16 e parti selezionate dei Capitoli 9, 12, 19 e 20. Gli argomenti non trattati a lezione possono rappresentare una risorsa preziosa per lo studio individuale e nel corso degli anni.

L'Autore

Douglas C. Giancoli ha conseguito la laurea (*Bachelor of Arts*) in Fisica all'Università della California a Berkeley con il massimo dei voti (*summa cum laude*). Ha ottenuto il Master of Science in Fisica al MIT e il dottorato (PhD) in Fisica delle particelle elementari di nuovo a Berkeley. Ha lavorato due anni come membro interno del laboratorio microbiologico (ricerca sui virus), sviluppando competenze in biologia molecolare e in biofisica.

Tra i suoi mentori si possono annoverare i premi Nobel Emilio Segré e Donald Glaser.

Ha tenuto molti corsi universitari, di taglio sia tradizionale sia innovativo, e continua ad aggiornare meticolosamente i propri libri di testo, pensando sempre a come offrire agli studenti una migliore comprensione della fisica.

Nel tempo libero ama le attività all'aperto e in particolare pratica l'alpinismo. Sostiene che scalare una vetta sia come imparare la fisica: richiede sforzo, ma la ricompensa è grande.

A chi studia

Come studiare

1. **Leggi il capitolo**. Impara i concetti e le notazioni. Prova a rispondere ai quesiti e a risolvere gli esercizi proposti. Segui attentamente i passaggi degli esempi concettuali e delle derivazioni. Non perdere tempo a guardare uno schermo, la carta è migliore dei pixel quando si tratta di imparare e pensare.
2. **Partecipa a tutte le lezioni.** Ascolta. Prendi appunti. Poni delle domande (tutti vorrebbero farlo, ma forse tu ne avrai il coraggio). Potrai sfruttare meglio la lezione se prima avrai letto il relativo capitolo.
3. **Leggi di nuovo il capitolo**, prestando attenzione ai dettagli. Segui derivazioni ed esempi concettuali. Cerca di comprenderne la logica. Risolvi il maggior numero di esercizi possibile e rispondi ai quesiti e ai "Quesiti e convinzioni errate" di fine capitolo.
4. **Risolvi da 10 a 20 dei problemi** presenti alla fine del capitolo. Risolvendo i problemi capirai quello che hai imparato e quello che non hai ancora appreso bene. Parlane con i tuoi colleghi. Risolvere i problemi è uno dei modi migliori per imparare. Non cercare solo la formula che serve per la soluzione, potrebbe essere quella sbagliata.

Note sul formato e sulla risoluzione dei problemi

1. I paragrafi contrassegnati da un asterisco (*) sono da considerare **facoltativi**. Possono essere tralasciati senza che si perda il filo logico del discorso. Nessun argomento successivo, a parte eventuali altri paragrafi facoltativi, dipende dal loro apprendimento. Tieni conto però che questi paragrafi potrebbero essere interessanti e piacevoli da leggere.
2. Nel testo si utilizzano le **convenzioni** usuali: i simboli per le grandezze (per esempio m per la massa) sono in corsivo, mentre le unità di misura (come m per metro) sono in tondo. I simboli relativi ai vettori portano una freccetta sopra: $\vec{F}$.
3. Poche equazioni sono valide in tutte le situazioni. Nei casi significativi, le **limitazioni** delle equazioni importanti sono indicate tra parentesi quadre accanto all'equazione. Le equazioni che rappresentano le principali leggi della fisica sono evidenziate da un

fondino colorato; questo vale anche per alcune altre equazioni indispensabili.

4. Alla fine di ogni capitolo viene presentata una serie di **Problemi** e **Quesiti e convinzioni errate**, cioè test a risposta multipla, che offrono alla valutazione soluzioni errate ma comuni insieme a soluzioni corrette. Più importanti sono i problemi, classificati per difficoltà nei livelli I, II o III. I problemi di livello I sono i più semplici, quelli di livello II sono di difficoltà standard, quelli di livello III ti metteranno particolarmente alla prova. I problemi sono raggruppati in paragrafi, ma i problemi di un dato paragrafo possono basarsi sul materiale precedente. Per ogni capitolo è presente un certo numero di **Problemi generali**, che non sono né organizzati per paragrafi, né classificati per difficoltà. I problemi relativi ai paragrafi facoltativi sono anch'essi contrassegnati da un asterisco (*). Le **risposte** ai problemi di numero dispari sono disponibili nel sito dedicato al libro raggiungibile all'indirizzo online.universita.zanichelli.it/giancolifisica1-3e.
5. Essere capaci di risolvere i problemi è parte integrante e cruciale dell'apprendimento della fisica, e fornisce un notevole aiuto alla comprensione dei concetti e dei principi. Questo libro contiene diversi suggerimenti e aiuti alla risoluzione dei problemi: (*a*) sono presenti **Esempi** completamente risolti, che dovrebbero essere studiati come parte integrante del testo; (*b*) alcuni degli Esempi risolti sono **Esempi di stima**, che mostrano come è possibile ottenere risultati approssimati anche in presenza di un numero limitato di informazioni (*vedi* par. 1.6); (*c*) in tutto il testo sono presenti **Guide alla risoluzione dei problemi** che suggeriscono come affrontare passo dopo passo la risoluzione dei problemi relativi a un determinato argomento – ricorda, però, che le strategie di fondo rimangono sempre le stesse. Molte di queste guide sono seguite da un esempio che viene risolto esplicitamente seguendo i passi suggeriti; (*d*) esistono paragrafi dedicati esplicitamente alla risoluzione dei problemi; (*e*) sono presenti anche delle note a margine per la risoluzione dei problemi che fanno riferimento ai suggerimenti presenti nel testo; (*f*) gli **Esercizi** presenti nel testo dovrebbero essere affrontati e risolti immediatamente, per poi confrontare la risposta con la soluzione data alla fine del capitolo; (*g*) alla fine di ogni capitolo si trovano numerosi problemi da svolgere (*vedi* punto 4).
6. Gli **Esempi concettuali** pongono domande che dovresti porti, su cui ragionare e dare una risposta. Datti del tempo per trovare la risposta prima di leggere la soluzione.
7. In **Appendice** troverai delle note di matematica e altre informazioni. Altri dati utili, fattori di conversione e formule matematiche si trovano nelle **Tavole** in fondo al libro.

Note sull’uso dei colori

Vettori

Un vettore generico

Il vettore risultante è leggermente più spesso

Le componenti di ogni vettore sono tratteggiate

Spostamento ($\vec{D}$, $\vec{r}$)

Velocità ($\vec{v}$)

Accelerazione ($\vec{a}$)

Forza ($\vec{F}$)

Forza su un secondo o

un terzo oggetto nella stessa figura

Quantità di moto ($\vec{p}$ o $m\vec{v}$)

Momento angolare ($\vec{L}$)

Velocità angolare ($\vec{\omega}$)

Momento torcente ($\vec{\tau}$)

Campo elettrico ($\vec{E}$)

Campo magnetico ($\vec{B}$)

Elettricità e magnetismo

Linee di campo elettrico

Linee equipotenziali

Linee di campo magnetico

Carica elettrica (+) + o +

Carica elettrica (–) – o –

Simboli di un circuito elettrico

Filo, con interruttore S

Resistore (o resistenza)

Condensatore

Induttore (o induttanza)

Batteria

Messa a terra

Ottica

Raggio di luce

Oggetto

Immagine reale (tratteggiata)

Immagine virtuale (tratteggiata e più chiara)

Altro

Livello energetico (di un atomo ecc.)

Linee di misura 1.0 m

Tragitto di un oggetto in movimento

Direzione del moto o corrente

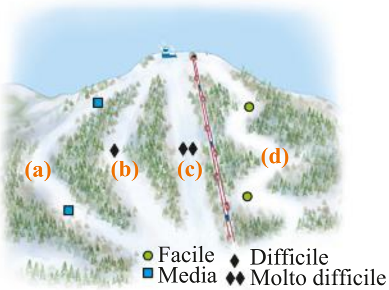
Un'atleta di salto con l'asta aumenta la propria energia cinetica via via che si avvicina alla sbarra. Quando pianta l'asta a terra, poggiando tutto il peso su di essa, l'energia cinetica inizia a trasformarsi: dapprima in energia potenziale elastica dell'asta che si incurva, poi in energia potenziale gravitazionale, a mano a mano che il corpo sale. Appena superata la sbarra, l'asta è perfettamente diritta e tutta l'energia potenziale elastica è stata convertita in energia potenziale gravitazionale. L'energia cinetica dell'atleta si è completamente trasformata in energia potenziale gravitazionale in corrispondenza della sbarra (nel record del mondo, a più di 6 m), che è quello che l'atleta desiderava. In questa e in qualunque altra trasformazione di energia, l'energia totale si conserva sempre. Quello della conservazione dell'energia è uno dei più importanti principi della fisica e trova applicazione in un ampio spettro di fenomeni.

Conservazione dell'energia

8

DOMANDA DI APERTURA DEL CAPITOLO – Prova a rispondere!

Una sciatrice scende dalla cima di un pendio. Qual è la pista lungo la quale la variazione della sua energia potenziale gravitazionale è maggiore: **(a)**, **(b)**, **(c)** o **(d)**? Oppure **(e)** sono tutte equivalenti? Nell'ipotesi che tutte le piste siano ghiacciate e prive di attrito, qual è la pista in fondo alla quale la sciatrice arriverebbe con la velocità maggiore? Rispondete alle stesse domande, considerando invece che ci sia attrito. Fate una lista delle vostre quattro risposte.



ARGOMENTI

8.1 Forze conservative e non conservative
8.2 Energia potenziale
8.3 Energia meccanica e sua conservazione
8.4 Conservazione dell'energia meccanica nella risoluzione dei problemi
8.5 Principio di conservazione dell'energia
8.6 Conservazione dell'energia in presenza di forze dissipative: guida alla risoluzione dei problemi
8.7 Energia potenziale gravitazionale e velocità di fuga
8.8 Potenza
8.9 Diagrammi dell'energia potenziale; equilibrio stabile e instabile
*8.10 Fionda gravitazionale

Il presente capitolo continua la trattazione, iniziata nel Capitolo 7, dei concetti di lavoro ed energia introducendo altre forme di energia, in particolare quella potenziale. Cerchiamo di vedere subito perché il concetto di energia sia così importante. La ragione, sostanzialmente, è che l'energia è una grandezza che si conserva: l'energia totale rimane sempre costante in qualunque processo fisico. La

 ISBN 978-88-08-29994-9

possibilità di definire una quantità che rimane costante, come è stato confermato finora dai nostri esperimenti, è un aspetto importante della Natura.

Il principio di conservazione dell'energia, infatti, è uno dei più importanti principi di unificazione della scienza. Esso fornisce anche un altro utile strumento, un approccio alternativo per risolvere gli esercizi. In molte situazioni un'analisi basata sui principi della dinamica sarebbe complicata, se non impossibile: le forze, per esempio, potrebbero non essere note o misurabili. Situazioni di questo tipo possono essere affrontate ricorrendo appunto al principio di conservazione dell'energia.

In questo capitolo, i corpi saranno considerati come puntiformi, oppure come corpi rigidi, ma coinvolti solo in moti di traslazione, senza moti interni o rotatori.

8.1 Forze conservative e non conservative

Come ci renderemo conto tra poco, è importante distinguere le forze in due classi: conservative e non conservative. Per definizione, una forza si dice **conservativa** se

▶ Definizione di legge conservativa

il lavoro che la forza compie su una particella, quando questa si sposta da un punto a un altro, dipende solo dalla posizione iniziale e da quella finale ed è indipendente dalla particolare traiettoria seguita.

Una forza conservativa dipende *solo dalla posizione*, non deve dipendere da altre grandezze come il tempo e la velocità.

Possiamo verificare facilmente che la forza di gravità rientra nella categoria delle forze conservative. La forza gravitazionale, che agisce su una particella di massa m, in prossimità della superficie terrestre, è $\vec{F} = m\vec{g}$, dove $\vec{g}$ è un vettore costante. Il lavoro compiuto da questa forza su una particella che cade da una quota h è $W_G = Fd = mgh$ (**Figura 8.1a**). Supponiamo ora che, anziché muoversi solo verticalmente verso l'alto o verso il basso, la particella segua una traiettoria arbitraria nel piano xy, come mostrato nella **Figura 8.1b**. Essa inizia a muoversi dalla posizione alla quota y_1 e raggiunge la quota y_2, dove $y_2 - y_1 = h$. Per calcolare il lavoro compiuto dalla forza di gravità usiamo l'Equazione 7.7:

$$W_G = \int_1^2 \vec{F}_G \cdot d\vec{\ell} = \int_1^2 mg\cos\theta\, d\ell.$$

Chiamiamo $\phi = 180° - \theta$, l'angolo compreso tra $d\vec{\ell}$ e la sua componente verticale dy, come mostrato nella Figura 8.1b. Tenendo conto che $\cos\theta = -\cos\phi$ (*vedi* Appendice A.9) e $dy = d\ell\cos\phi$, abbiamo

$$W_G = -\int_1^2 mg\, dy = -mg(y_2 - y_1). \tag{8.1}$$

La quantità $(y_2 - y_1)$ rappresenta la variazione di quota; vediamo quindi come il lavoro dipenda solo dalla variazione di quota e *non* dalla particolare traiettoria seguita! Secondo la definizione data all'inizio, dedurremo che la forza di gravità è una forza conservativa.

Nel caso particolare della Figura 8.1b, $y_2 > y_1$ e quindi il lavoro compiuto dalla gravità è negativo. Nel caso in cui $y_2 < y_1$, con la particella in caduta, W_G è positivo.

Possiamo definire una forza conservativa anche in una maniera differente, ma del tutto equivalente alla prima:

una forza è conservativa se il lavoro compiuto dalla forza lungo un qualunque percorso chiuso è zero.

Per mostrare che questa definizione è equivalente a quella data all'inizio, consideriamo una particella che si muova dal punto 1 al punto 2 seguendo uno dei due percorsi denotati con A e B nella **Figura 8.2a**. Se assumiamo che sulla particella agisca una forza conservativa, il lavoro compiuto da questa forza è lo stesso sia che la particella si muova lungo il percorso A sia che si muova lungo il percorso B, come conseguenza

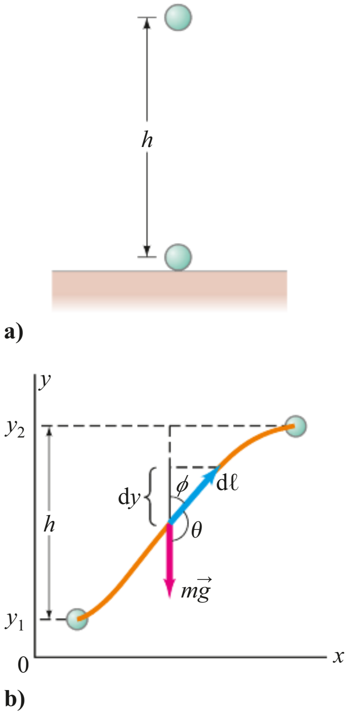


Figura 8.1 Una particella di massa m **a)** cade lungo la verticale da una quota h; **b)** è sollevata lungo una traiettoria bidimensionale arbitraria.

della nostra prima definizione. Indichiamo con W il lavoro dal punto 1 al punto 2; consideriamo adesso il percorso chiuso mostrato nella **Figura 8.2b**. La particella si muove da 1 a 2 seguendo il percorso A e la forza compie il lavoro W. La stessa particella ritorna poi nel punto 1 tramite il percorso B. Quanto lavoro viene compiuto dalla forza nel percorso di ritorno? Andando da 1 a 2 lungo il percorso B viene compiuto il lavoro W, che per definizione è uguale a $\int_1^2 \vec{F}\cdot \mathrm{d}\vec{\ell}$. Nel percorso inverso, andando da 2 a 1, la forza $\vec{F}$ in ogni punto è la stessa di prima, ma $\mathrm{d}\vec{\ell}$ è diretto esattamente in verso opposto. Di conseguenza $\vec{F}\cdot \mathrm{d}\vec{\ell}$ ha segno opposto in ogni punto del percorso e quindi il lavoro totale compiuto percorrendolo in senso inverso da 2 a 1 è $-W$. In definitiva, il lavoro totale compiuto andando da 1 a 2 e tornando a 1 è $W + (-W) = 0$, il che dimostra l'equivalenza delle due definizioni date per le forze conservative.

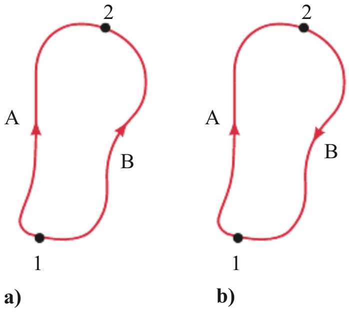


Figura 8.2 **a)** Una particella si muove tra i punti 1 e 2 seguendo due diverse traiettorie, A e B. **b)** La particella si muove in un percorso chiuso, dal punto 1 al punto 2 seguendo la traiettoria A e torna indietro seguendo la traiettoria B.

La seconda definizione mette in evidenza un aspetto importante di una forza di questo tipo: il **lavoro compiuto da una forza conservativa è recuperabile**, nel senso che se viene compiuto un lavoro positivo da una particella (o da qualunque altro corpo) lungo un tratto di un percorso chiuso, una quantità uguale di lavoro ma di segno opposto verrà compiuta nel resto del percorso.

Come abbiamo visto in precedenza, la forza di gravità è di tipo conservativo, ed è facile mostrare che lo è anche la forza elastica ($F = -kx$).

Molte altre forze, come quella di attrito, la spinta e la trazione esercitate da una persona, sono invece **forze non conservative**: qualunque lavoro da esse compiuto dipende dal percorso seguito. Per esempio, se spingete una cassa su un pavimento scabro da un punto a un altro, il lavoro compiuto cambia a seconda che il percorso che seguite sia quello rettilineo o un qualunque altro percorso curvo. Come mostrato nella **Figura 8.3**, per spingere la cassa dal punto 1 al punto 2 seguendo il percorso semicircolare più lungo dovete compiere più lavoro contro l'attrito che per spingerla lungo il percorso rettilineo. Questo accade sia perché dovete percorrere una distanza maggiore, sia perché, diversamente dalla forza peso, la forza di spinta $\vec{F}_\mathrm{S}$ ha sempre direzione e verso uguali a quelli del moto. Il lavoro compiuto dalla persona nella Figura 8.3, quindi, non dipende *solo* dai punti 1 e 2, ma anche dal percorso seguito. La forza di attrito dinamico, mostrata anche nella Figura 8.3, si oppone sempre al moto; si tratta di una forza non conservativa e di come trattarla parleremo nel seguito di questo capitolo (par. 8.6). Nella **Tabella 8.1** sono elencate alcune forze conservative e alcune forze non conservative.

Tabella 8.1 Forze conservative e non conservative

Forze conservative	Forze non conservative
• Forza gravitazionale	• Forza di attrito
• Forza elastica	• Forza di resistenza dell'aria
• Forza elettrica	• Tensione in una corda
	• Forza di propulsione di un motore o di un razzo
	• Forza di spinta o di trascinamento da parte di una persona

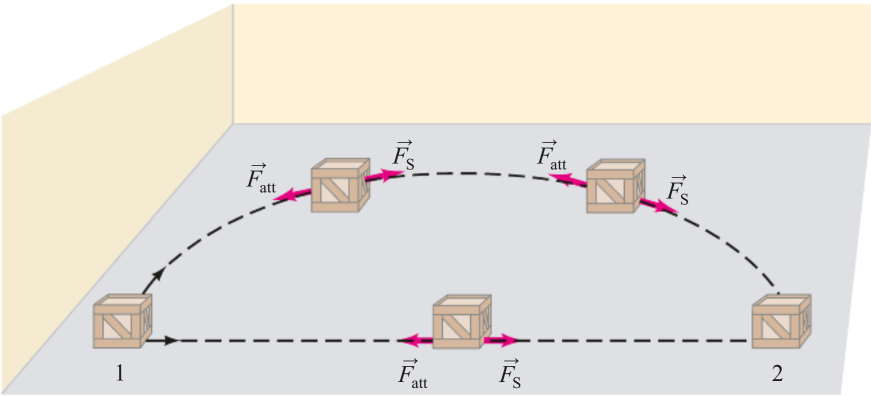


Figura 8.3 Una cassa viene spinta a velocità costante su un pavimento scabro dalla posizione 1 alla posizione 2 seguendo due percorsi, uno rettilineo e l'altro curvo. La forza di spinta $\vec{F}_\mathrm{S}$ ha sempre verso concorde a quello del moto (la forza di attrito si oppone al moto). Per una forza a modulo costante, come quella di spinta, il lavoro è $W = F_\mathrm{S}d$, e quindi maggiore è d (come nel caso del percorso curvo), maggiore è W. Il lavoro compiuto non dipende solo dai punti 1 e 2; dipende anche dal percorso seguito.

 ISBN 978-88-08-29994-9

8.2 Energia potenziale

Nel Capitolo 7 abbiamo discusso l'energia associata al movimento di un corpo, che abbiamo chiamato energia cinetica, $K = 1/2\ mv^2$. Nel presente capitolo vogliamo introdurre il concetto di **energia potenziale**, definendola come una forma di energia associata alle interazioni tra corpi, che dipende dalla posizione di questi rispetto agli oggetti circostanti. Possono essere definiti vari tipi di energia potenziale, ognuno dei quali è associato a una particolare *forza conservativa*.

La molla carica di un giocattolo ci offre un esempio di energia potenziale. La molla acquista energia potenziale quando viene compiuto del lavoro *su di essa* dalla persona che carica il giocattolo. A mano a mano che la corda della molla gira, esercita una forza e compie lavoro per far muovere il giocattolo.

Energia potenziale gravitazionale

L'esempio più comune di energia potenziale è quello dell'*energia potenziale gravitazionale*. Un mattone tenuto sollevato al di sopra del livello del suolo possiede energia potenziale a causa della sua posizione rispetto alla Terra. Il mattone tenuto sollevato può compiere lavoro in quanto, se viene lasciato, cade al suolo per effetto della forza di gravità e potrebbe, per esempio, compiere lavoro su un paletto, piantandolo nel terreno.

Cerchiamo di ricavare l'espressione dell'energia potenziale gravitazionale di un corpo in prossimità della superficie terrestre. Per sollevare verticalmente un corpo di massa m, deve essere esercitata una forza verso l'alto, per esempio dalla mano di una persona, almeno uguale in modulo al peso del corpo, mg. Per sollevarlo senza accelerazione di un tratto h, dalla posizione y_1 alla posizione y_2 nella **Figura 8.4** (il verso positivo è quello verso l'alto), una persona deve compiere un lavoro uguale al prodotto della forza "esterna" che questa esercita verso l'alto, $F_{ext} = mg$, per la variazione di quota h. Vale a dire,

$$W_{ext} = \vec{F}_{ext} \cdot \vec{d} = mgh\cos 0^\circ = mgh = mg(y_2 - y_1)$$

dove sia $\vec{F}_{ext}$ che $\vec{d}$ puntano verso l'alto. Sul corpo, che si sposta da y_1 a y_2, agisce anche la forza di gravità che compie un lavoro sul corpo pari a

$$W_G = \vec{F}_G \cdot \vec{d} = mgh\cos 180° = -mgh = -mg(y_2 - y_1)$$

dove $\theta = 180°$, in quanto $\vec{F}_G$ e $\vec{d}$ puntano in versi opposti. Essendo $\vec{F}_G$ diretta verso il basso e $\vec{d}$ verso l'alto, W_G risulta essere negativo. Anche se il corpo segue un percorso arbitrario, come nella Figura 8.1b, il lavoro compiuto dalla gravità dipende solo dalla variazione di quota (Eq. 8.1): $W_G = -mg(y_2 - y_1) = -mgh$.

Se poi lasciamo cadere il corpo liberamente sotto l'azione della gravità e con velocità iniziale nulla, esso, dopo essere caduto da un'altezza h, acquista una velocità data da $v^2 = 2gh$ (Eq. 2.12c). La sua energia cinetica è, quindi, $1/2mv^2 = 1/2m(2gh) = mgh$ e, se urta su un paletto, può compiere un lavoro sul paletto stesso pari proprio a mgh.

Ricapitolando, per sollevare un corpo di massa m fino a un'altezza h è *richiesto* un lavoro uguale a mgh. Una volta all'altezza h, il corpo è *in grado* di compiere un lavoro pari a mgh. Possiamo affermare, dunque, che il lavoro compiuto per sollevare il corpo è stato immagazzinato sotto forma di energia potenziale gravitazionale.

A questo punto possiamo definire la *variazione dell'energia potenziale gravitazionale U*, quando un corpo si sposta da una quota y_1 a una quota y_2, come il lavoro che una forza esterna deve compiere per realizzare lo spostamento senza accelerazione del corpo:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = W_{ext} = mg(y_2 - y_1).$$

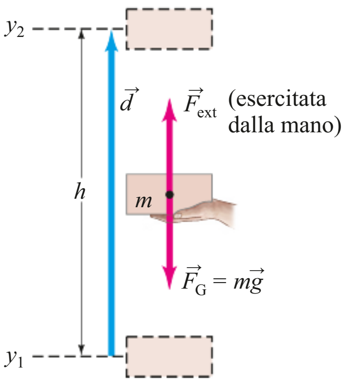


Figura 8.4 Una persona esercita una forza verso l'alto, $F_{ext} = mg$, per sollevare un mattone dalla quota y_1 alla quota y_2.

In maniera equivalente e più diretta potremmo definire la *variazione dell'energia potenziale gravitazionale* come l'*opposto del lavoro compiuto dalla gravità* nello stesso processo:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = -W_G = mg(y_2 - y_1). \tag{8.2}$$

L'Equazione 8.2 fornisce la variazione dell'energia potenziale gravitazionale nel caso di un corpo di massa m che si sposta tra due punti prossimi alla superficie della Terra. **L'energia potenziale gravitazionale**, U, per un qualunque punto a quota h rispetto a una posizione di riferimento (l'origine del sistema di coordinate, per esempio) è definita come

$$U_G = mgy. \qquad \text{[vale solo per la gravità]} \quad (8.3)$$

È da tenere presente che l'energia potenziale è associata alla forza di gravità che si esercita tra la Terra e la massa m. U_G rappresenta, quindi, l'energia potenziale gravitazionale, non solo della massa m, ma dell'intero sistema massa-Terra.

L'energia potenziale gravitazionale dipende dalla *quota* del corpo *al di sopra di un livello di riferimento*, $U = mgy$. In alcune circostanze vi potreste chiedere a partire da quale livello misurare y. L'energia potenziale gravitazionale di un libro tenuto più in alto del piano di un tavolo, per esempio, cambia a seconda che si misuri y dal piano del tavolo, dal pavimento o da qualunque altro livello. Ciò che è importante dal punto di vista fisico è la *variazione* dell'energia potenziale, ΔU, in quanto è questa che è legata al lavoro compiuto, ed è solo ΔU che può essere misurata. In sostanza possiamo scegliere di misurare y da qualunque livello di riferimento che risulti conveniente; dobbiamo però *scegliere tale livello una volta per tutte all'inizio e utilizzare sempre lo stesso in tutti i calcoli successivi*. La *variazione* dell'energia potenziale tra due punti qualunque è indipendente da questa scelta.

ATTENZIONE
Solo la variazione di energia potenziale ha significato fisico

L'energia potenziale appartiene al *sistema* e non al singolo corpo. L'energia potenziale è associata a una forza, e una forza su un corpo è sempre esercitata da un altro corpo. L'energia potenziale, quindi, è una proprietà di un intero sistema. La variazione di energia potenziale gravitazionale per un corpo sollevato fino a una quota y sopra la superficie della Terra è mgy. In questo caso il sistema è costituito dal corpo e dalla Terra, e sono coinvolte le proprietà di entrambi: corpo (m) e Terra (g). In generale, un **sistema** è costituito da uno o più corpi che scegliamo di studiare; la scelta dei suoi componenti appartiene a noi, in genere cerchiamo di operare la scelta più semplice. Quando, più avanti, avremo a che fare con l'energia potenziale di un corpo a contatto con una molla, il nostro sistema sarà costituito dall'insieme del corpo e della molla.

ATTENZIONE
L'energia potenziale appartiene al sistema, non a una singola particella

ESEMPIO 8.1

Variazioni dell'energia potenziale sulle montagne russe

Un trenino delle montagne russe, di massa 1000 kg, si sposta dalla posizione 1 (**Figura 8.5**) alla posizione 2 e, ancora, alla posizione 3. (a) Quanto vale l'energia potenziale gravitazionale nelle posizioni 2 e 3 rispetto al livello della posizione 1? Considerate $y = 0$ nella posizione 1. (b) Quanto vale la variazione di energia potenziale quando il trenino si sposta dalla posizione 2 alla posizione 3? (c) Rispondete ai punti (a) e (b) considerando come livello di riferimento ($y = 0$) quello della posizione 3.

APPROCCIO Siamo interessati all'energia potenziale del sistema trenino-Terra. Consideriamo positivo y rivolto verso l'alto e usiamo la definizione di energia potenziale gravitazionale per calcolare l'energia potenziale.

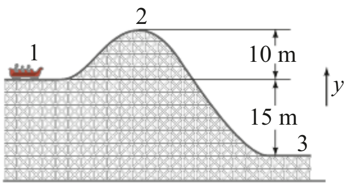


Figura 8.5 Esempio 8.1.

 ISBN 978-88-08-29994-9

ESEMPIO 8.4

Calcolo della velocità di un trenino delle montagne russe mediante la conservazione dell'energia

Assumendo che l'altezza della collina della Figura 8.8 sia di 40 m e che il trenino delle montagne russe parta dalla cima con velocità iniziale nulla, calcolate (*a*) la velocità del trenino in fondo alla collina e (*b*) l'altezza in cui ha metà di questa velocità. Sia $y = 0$ in fondo alla collina. Ignorate le forze di attrito.

APPROCCIO Consideriamo come posizione 1 quella da cui parte il trenino ($v_1 = 0$) in cima alla collina ($y_1 = 40$ m) e quella sul fondo come posizione 2, che scegliamo come livello di riferimento, $y_2 = 0$. Nella parte (*b*) considereremo y_2 un'incognita. Applichiamo il principio di conservazione dell'energia meccanica.

SOLUZIONE (*a*) Usiamo l'Equazione 8.12 che, ponendo $v_1 = 0$ e $y_2 = 0$, diventa

$$mgy_1 = \frac{1}{2}mv_2^2$$

da cui

$$v_2 = \sqrt{2gy_1} = \sqrt{2(9.8\ \text{m/s}^2)(40\ \text{m})} = 28\ \text{m/s}.$$

(*b*) Imponiamo ancora la conservazione dell'energia meccanica,

$$\frac{1}{2}mv_1^2 + mgy_1 = \frac{1}{2}mv_2^2 + mgy_2,$$

dove poniamo $v_2 = 1/2\ (28\ \text{m/s}) = 14\ \text{m/s}$ e $v_1 = 0$, mentre y_2 è incognita. Ricaviamo che

$$y_2 = y_1 - \frac{v_2^2}{2g} = 40\ \text{m} - \frac{(14\ \text{m/s})^2}{2(9.8\ \text{m/s}^2)} = 30\ \text{m}.$$

Il trenino, dunque, ha una velocità di 14 m/s quando si trova a una quota di 30 m rispetto al punto più basso, sia nella fase di discesa della collina a sinistra sia nella fase di salita della collina a destra.

Le relazioni matematiche usate nell'Esempio 8.4 delle montagne russe sono analoghe a quelle impiegate nell'Esempio 8.3, anche se tra i due esempi c'è un'importante differenza. Nell'Esempio 8.3 il moto si svolge lungo la verticale, per cui sarebbe stato possibile risolverlo usando i concetti di forza e di accelerazione e le equazioni della cinematica (Eq. 2.12). Nel caso delle montagne russe, invece, dove il moto non avviene solo nella direzione verticale, non avremmo potuto usare le Equazioni 2.12 in quanto a non è costante lungo la traiettoria curva; la conservazione dell'energia, tuttavia, ci fornisce un metodo di risoluzione e la risposta.

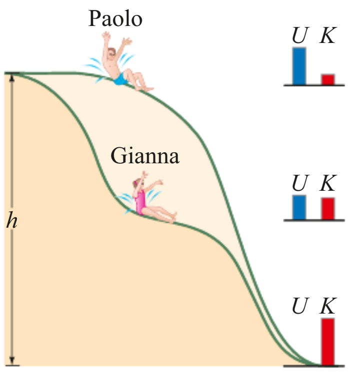


Figura 8.9 Esempio 8.5. Notate i grafici a barre che rappresentano l'energia potenziale U e l'energia cinetica K in tre diverse posizioni.

ESEMPIO CONCETTUALE 8.5

Calcolo della velocità su due scivoli d'acqua

Due scivoli d'acqua di una piscina sono sagomati in modo differente, ma partono dalla stessa altezza h (**Figura 8.9**). Paolo e Gianna, inizialmente fermi, cominciano a scendere lungo i due scivoli nello stesso istante. (*a*) Chi dei due possiede la velocità maggiore in fondo allo scivolo? (*b*) Chi dei due arriva prima in fondo? Trascurate eventuali forze di attrito e assumete che i due scivoli abbiano la stessa lunghezza complessiva.

RISPOSTA (*a*) L'energia potenziale iniziale di ognuno, mgh, viene trasformata in energia cinetica, e quindi la velocità v alla base dello scivolo può essere

ISBN 978-88-08-29994-9

ricavata dalla relazione $1/2mv^2 = mgh$. La massa si semplifica e la velocità risulta essere la stessa, indipendentemente dalla persona che scende. Visto che scendono dalla stessa quota, arriveranno alla base con la stessa velocità. (*b*) Notate che Gianna si trova sistematicamente a una quota più bassa di quella di Paolo, dall'inizio alla fine. Questo significa che Gianna converte la propria energia potenziale in energia cinetica più rapidamente di Paolo. Di conseguenza, Gianna ha sempre una velocità maggiore di Paolo e, visto che la distanza da percorrere è la stessa, arriva per prima alla base.

Figura 8.10 La trasformazione dell'energia nel salto con l'asta.

ESERCIZIO C Due palle sono lasciate cadere dalla stessa altezza sul pavimento. La palla A cade liberamente nell'aria, mentre la palla B segue una traiettoria curva, priva di attrito, fino al pavimento. C'è differenza tra le velocità di A e B nel momento in cui toccano il pavimento?

In numerosi sport si possono trovare esempi sul principio di conservazione dell'energia come, per esempio, nel salto con l'asta, illustrato nella **Figura 8.10**. Con le approssimazioni che siamo spesso costretti a fare possiamo riassumere la sequenza di trasformazioni fisiche nel salto con l'asta nel seguente modo. L'energia cinetica iniziale dell'atleta in corsa si trasforma in energia potenziale elastica dell'asta incurvata che, appena l'atleta si stacca dal suolo, comincia a trasformarsi in energia potenziale gravitazionale. Quando l'atleta raggiunge il punto più alto e l'asta si è raddrizzata, l'energia è stata trasformata completamente in energia potenziale gravitazionale (se trascuriamo la piccola velocità orizzontale dell'atleta sulla sbarra). L'asta di per sé non fornisce energia, ma è uno strumento che *immagazzina* energia favorendone la trasformazione dalla forma cinetica a quella potenziale gravitazionale. La quantità di energia necessaria per superare la sbarra dipende dall'altezza che deve raggiungere il centro di massa (CM) dell'atleta. Piegando opportunamente il corpo, gli atleti del salto con l'asta riescono a mantenere il proprio CM lievemente al di sotto della sbarra mentre la scavalcano (**Figura 8.11**), riuscendo così a superare sbarre più alte di quanto sarebbe possibile altrimenti (il centro di massa sarà argomento del Capitolo 9).

FISICA APPLICATA
Sport

ESEMPIO 8.6 ■ Stima

Salto con l'asta

Fornite una stima dell'energia cinetica e della velocità necessarie a un atleta di 70 kg per superare una sbarra alta 5.0 m. Assumete che il centro di massa dell'atleta si trovi inizialmente a 0.9 m dal suolo e che la massima altezza raggiunta sia esattamente quella della sbarra.

APPROCCIO Uguagliamo l'energia totale che l'atleta possiede un istante prima che pianti l'asta sulla pista (e l'asta inizi a piegarsi immagazzinando energia potenziale) a quella che possiede quando si trova esattamente sopra la sbarra (trascuriamo la piccola energia cinetica che possiede in questa posizione). Fissiamo $y_1 = 0$ nella posizione iniziale del centro di massa del saltatore. Il suo corpo deve essere sollevato fino a un'altezza $y_2 = 5.0\text{ m} - 0.9\text{ m} = 4.1\text{ m}$.

SOLUZIONE Applicando l'Equazione 8.12 si ha,

$$\frac{1}{2}mv_1^2 + 0 \square 0 + mgy_2$$

e quindi

$$K_1 = \frac{1}{2}mv_1^2 = mgy_2 = (70\text{ kg})(9.8\text{ m/s}^2)(4.1\text{ m}) = 2.8\times10^3\text{ J}.$$

Figura 8.11 Piegando opportunamente il corpo, gli atleti del salto con l'asta possono mantenere il loro centro di massa abbastanza basso da farlo passare sotto la sbarra.

 ISBN 978-88-08-29994-9

l'energia dissipata è semplicemente uguale a $-\vec{F}_{\text{att}}\ell$ (il segno meno appare perché $\vec{F}_{\text{att}}$ e $\mathrm{d}\vec{\ell}$ hanno verso opposto), dove ℓ è la distanza effettivamente percorsa lungo la traiettoria dalla posizione 1 alla posizione 2. Dal teorema dell'energia cinetica (Eq. 7.11) sappiamo che il lavoro totale W_{tot} eseguito su un corpo è uguale alla variazione dell'energia cinetica K:

$$\Delta K = W_{\text{tot}}.$$

Possiamo separare il lavoro totale in due contributi,

$$W_{\text{tot}} = W_{\text{C}} + W_{\text{NC}},$$

dove W_{C} è il lavoro fatto dalle forze conservative (la gravità nel caso del nostro trenino) e W_{NC} è il lavoro dovuto alle forze non conservative (l'attrito nel nostro esempio). Abbiamo visto dall'Equazione 8.4 che il lavoro svolto da una forza conservativa può essere scritto nei termini dell'energia potenziale:

$$W_{\text{C}} = \int_1^2 \vec{F}\cdot \mathrm{d}\vec{\ell} = -\Delta U.$$

Allora da $\Delta K = W_{\text{tot}} = W_{\text{C}} + W_{\text{NC}}$ e $W_{\text{C}} = -\Delta U$ possiamo scrivere

$$\Delta K + \Delta U = W_{\text{NC}}. \tag{8.15a}$$

► Il teorema dell'energia cinetica e la conservazione dell'energia

Questa equazione rappresenta la forma generale del teorema dell'energia cinetica. Essa esprime anche il principio di conservazione dell'energia; per il nostro trenino, W_{NC} è il lavoro dovuto alla forza di attrito e rappresenta la produzione di energia termica. L'Equazione 8.15a è valida sempre. W_{NC} sul lato destro dell'Equazione 8.15a rappresenta il lavoro svolto da tutte le forze non conservative, quelle non incluse nel termine ΔU che compare nel lato sinistro, relativo alle sole forze conservative.

Riscriviamo l'Equazione 8.15a per il nostro esempio relativo al trenino sulle montagne russe di Figura 8.8, in presenza di attrito, con $W_{\text{NC}} = -F_{\text{att}}\,\ell$ come abbiamo discusso sopra:

$$W_{\text{NC}} = -F_{\text{att}}\ell = \Delta K + \Delta U = \left(\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2\right) + (mgy_2 - mgy_1)$$

o

$$\frac{1}{2}mv_1^2 + mgy_1 = \frac{1}{2}mv_2^2 + mgy_2 + F_{\text{att}}\ell. \quad \text{[con forza di gravità e attrito]} \tag{8.15b}$$

A primo membro abbiamo l'energia meccanica iniziale del sistema. Tale energia deve essere uguale alla somma dell'energia meccanica in una qualunque altra posizione della traiettoria e dell'energia termica (o interna) prodotta nel processo. Tutte le altre forze non conservative possono essere trattate in maniera simile. Se non siete sicuri del segno dell'ultimo termine a secondo membro ($\int \vec{F}\cdot\mathrm{d}\vec{\ell}$), usate l'intuizione: l'energia meccanica aumenta o diminuisce nel processo?

ESERCIZIO D Provate a rispondere nuovamente alla Domanda di apertura del capitolo. Cercate di spiegare perché la prima volta potreste aver risposto diversamente.

PROBLEM SOLVING
È meglio usare l'energia o i principi della dinamica?

A volte potreste chiedervi se sia meglio affrontare un problema usando il lavoro e l'energia o invece utilizzando i principi della dinamica. Come linea guida approssimativa, se le forze coinvolte sono costanti, entrambi gli approcci possono avere successo. Se le forze non sono costanti, e/o il percorso da seguire non è semplice, l’utilizzo del principio di conservazione dell’energia può rappresentare l’approccio migliore.

Per risolvere un esercizio non è possibile fornire semplicemente un insieme di regole fisse. La *Guida alla risoluzione dei problemi*, come tutte le altre proposte, non vuole essere quindi una prescrizione esatta dei passi da seguire, bensì una raccolta degli elementi chiave per aiutarvi a risolvere esercizi che riguardano la conservazione dell’energia.

GUIDA ALLA RISOLUZIONE DEI PROBLEMI — Conservazione dell’energia

1. **Fare un disegno** della configurazione fisica.
2. **Definire il sistema** al quale sarà applicato il principio di conservazione dell’energia: il corpo o i corpi e le forze agenti.
3. **Definire** le grandezze da calcolare, **scegliere la posizione iniziale** (posizione 1) **e quella finale** (posizione 2).
4. Se la quota del corpo che state studiando cambia nel corso dell’esercizio, **scegliere un sistema di coordinate** che abbia la quota $y = 0$ conveniente ai fini del calcolo dell’energia potenziale gravitazionale; spesso la scelta migliore è la posizione più bassa che si trova nell’esercizio. Se sono coinvolte delle molle, fate corrispondere x (o y) $= 0$ alla posizione della molla a riposo.
5. **L’energia meccanica si conserva?** Se non agiscono forze di attrito o altre forze non conservative, allora vale la conservazione dell’energia meccanica:
$$K_1 + U_1 = K_2 + U_2.$$
6. **Applicare la conservazione dell’energia.** Se agiscono forze di attrito (o altre forze non conservative) è necessario tenere conto del termine aggiuntivo. Se la forza di attrito è costante e agisce per una distanza ℓ, vale la relazione
$$K_1 + U_1 = K_2 + U_2 + F_{att}\ell.$$
Nel caso di altre forze non conservative cercate di ricorrere all’intuito per determinare il segno del termine $\int \vec{F} \cdot d\vec{\ell}$: l’energia meccanica totale aumenta o diminuisce?
7. Usare le equazioni che avete scritto per **calcolare** il valore della grandezza incognita.

ESEMPIO 8.10 ■ Stima

Attrito sul trenino delle montagne russe

Il trenino delle montagne russe dell’Esempio 8.4 raggiunge una quota di soli 25 m sulla seconda collina, prima di fermarsi per un istante (**Figura 8.16**). Il trenino aveva percorso una distanza totale di 400 m. Calcolare l’energia termica prodotta e fornire una stima della forza di attrito media (assumendo che questa sia all’incirca costante) applicata al trenino, la cui massa è di 1000 kg.

■ **APPROCCIO** Seguiamo esattamente tutti i passi della precedente *Guida alla risoluzione dei problemi*.

■ **SOLUZIONE**

1. **Tracciare un disegno.** *Vedi* Figura 8.16.
2. **Scelta del sistema.** Il sistema è costituito dal trenino delle montagne russe e dalla Terra (che esercita la forza di attrazione gravitazionale), più la pista che esercita l’attrito e la forza normale sul trenino (in alternativa, potremmo prendere come nostro sistema solo il trenino e la Terra; in questo caso l’attrito rappresenterebbe una forza esterna che riduce l’energia meccanica, Eq. 8.15a). Le forze che agiscono sul trenino sono quella di gravità e quella di attrito (anche la reazione vincolare normale agisce sul trenino ma non compie lavoro, quindi non ha influenza sull’energia). Teniamo conto della gravità attraverso l’energia potenziale e dell’attrito mediante il termine $F_{att}\ell$.
3. **Scelta della posizione iniziale e di quella finale.** Prendiamo come posizione 1 quella in corrispondenza della quale si trova il trenino quando inizia a scen-

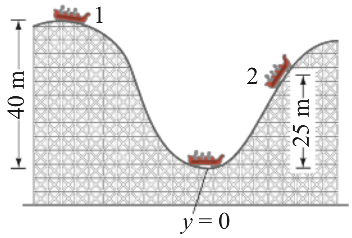


Figura 8.16 Esempio 8.10. A causa dell’attrito, il trenino della montagna russa non raggiunge, sulla seconda collina, l’altezza da cui era partito sulla prima collina (il disegno non è in scala).

 ISBN 978-88-08-29994-9

dere (dalla cima della prima collina), e come posizione 2 quella in cui si trova nell'istante in cui si ferma a 25 m di quota sulla seconda collina.

4. **Scegliere un sistema di coordinate.** Fissiamo $y = 0$ nel punto più in basso del moto. Questo punto è il livello di riferimento per l'energia potenziale gravitazionale.
5. **L'energia meccanica si conserva?** No: è presente la forza di attrito.
6. **Applicare il principio di conservazione dell'energia.** Dal momento che agisce una forza di attrito sul trenino, applichiamo il principio di conservazione dell'energia nella forma dell'Equazione 8.15, con $v_1 = 0$, $y_1 = 40$ m, $v_2 = 0$, $y_2 = 25$ m e $\ell = 400$ m. Otteniamo

$$0 + (1000\ \text{kg})(9.8\ \text{m/s}^2)(40\ \text{m}) = 0 + (1000\ \text{kg})(9.8\ \text{m/s}^2)(25\ \text{m}) + F_{\text{att}}\ell.$$

7. **Calcolo.** Risolvendo l'equazione precedente rispetto a $F_{\text{att}}\ell$, calcoliamo l'energia dissipata in energia termica:

$$F_{\text{att}}\ell = mg\,\Delta h = (1000\ \text{kg})(9.8\ \text{m/s}^2)(40\ \text{m} - 25\ \text{m}) = 147\,000\ \text{J}.$$

8. La forza di attrito media è stata

$$F_{\text{att}} = (1.47 \times 10^5\ \text{J})/400\ \text{m} = 370\ \text{N}.$$

NOTA Questo risultato rappresenta solo una media: la forza di attrito in ogni punto dipende dalla reazione vincolare normale, che varia con la pendenza.

ESEMPIO 8.11

Molla con forza di attrito

Un blocco di massa m si muove su un piano orizzontale scabro e ha velocità v_0 quando urta una molla, anch'essa orizzontale, di massa trascurabile (**Figura 8.17**), comprimendola di una quantità X. Se la costante elastica della molla è k, calcolare il coefficiente di attrito dinamico μ_d tra il blocco e il piano.

APPROCCIO Nell'istante in cui avviene la collisione, il blocco ha energia cinetica $K = 1/2\ mv_0^2$ e, assumendo che la molla sia a riposo, energia potenziale $U = 0$. L'energia meccanica iniziale del sistema è quindi $1/2\ mv_0^2$. Nell'istante in cui la molla raggiunge la massima compressione, $K = 0$ e $U = 1/2\ kX^2$. Mentre il blocco comprimeva la molla, la forza di attrito ($\mu_d F_N = \mu_d mg$) ha trasformato l'energia $F_{\text{att}} X = \mu_d mgX$ in energia termica.

SOLUZIONE Imponendo la conservazione dell'energia possiamo scrivere:

energia iniziale = energia finale

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = \frac{1}{2}kX^2 + \mu_d mgX.$$

Risolvendo rispetto a μ_d otteniamo

$$\mu_d = \frac{v_0^2}{2gX} - \frac{kX}{2mg}.$$

NOTA L'energia potenziale gravitazionale non cambia perché il movimento è orizzontale (y è costante in mgy).

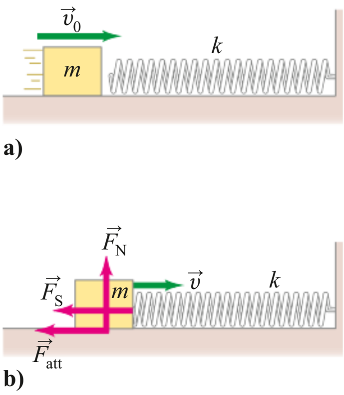


Figura 8.17 Esempio 8.11.

*Il teorema dell'energia cinetica e la conservazione dell'energia

Il principio di conservazione dell'energia ha un carattere più generale ed è più potente del teorema dell'energia cinetica. Per questo il teorema dell'energia cinetica *non* dovrebbe essere visto come espressione della conservazione dell'energia. Ciò nonostante, è molto utile per risolvere alcuni problemi di meccanica. La scelta tra l'applicazione del teorema dell'energia cinetica o del più potente principio di conservazione dell'energia dipende dalla *scelta del sistema* da studiare. Se per sistema scegliete una particella o un corpo rigido sul quale compiono lavoro delle forze esterne, potete usare il teorema dell'energia cinetica: il lavoro compiuto dalle forze esterne sul corpo che state considerando è uguale alla variazione della sua energia cinetica. D'altro canto, se state considerando un sistema sul quale le forze esterne non compiono lavoro, allora dovete applicare al sistema direttamente il principio di conservazione dell'energia.

Considerate, per esempio, un blocco connesso a una molla su un tavolo senza attrito (**Figura 8.18**). Se come sistema scegliete solo il blocco, allora il lavoro compiuto sul blocco dalla molla è uguale alla variazione di energia cinetica del blocco stesso: teorema dell'energia cinetica (la conservazione dell'energia non si applica a questo sistema; l'energia del blocco varia). Se come sistema scegliete, invece, l'insieme del blocco e della molla, non ci sono forze esterne che compiono lavoro (dal momento che la molla è parte del sistema); a questo sistema dovete quindi applicare il principio di conservazione dell'energia: se comprimete la molla e la rilasciate, la molla esercita una forza sul blocco, ma il moto che ne segue può essere discusso in termini di energia cinetica ($1/2mv^2$) e di energia potenziale ($1/2kx^2$), la cui somma rimane costante.

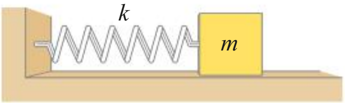


Figura 8.18 Un blocco è attaccato a una molla su un piano senza attrito. Se scegliete come sistema il blocco e la molla, allora $E = 1/2mv^2 + 1/2kx^2$ si conserva.

8.7 Energia potenziale gravitazionale e velocità di fuga

Finora nel presente capitolo, quando abbiamo considerato l'energia potenziale gravitazionale, abbiamo assunto che la forza di gravità fosse costante, $\vec{F} \square m\vec{g}$. Per i normali corpi in prossimità della superficie della Terra questa è un'assunzione accurata. Per considerare la gravità nella sua generalità, per punti che non si trovano in prossimità della superficie terrestre, dobbiamo tenere conto del fatto che la forza gravitazionale esercitata dalla Terra su una particella di massa m diminuisce in misura inversamente proporzionale al quadrato della distanza r dal centro della Terra. L'espressione esatta è data dalla legge di gravitazione universale di Newton (parr. 6.1 e 6.2):

$$\vec{F} = -G\frac{mM_T}{r^2}\hat{r} \qquad [r > r\mathrm{T}]$$

dove M_T è la massa della Terra e $\hat{r}$ è il versore (nella posizione occupata da m) diretto radialmente verso l'esterno rispetto al centro della Terra[2]. Il segno meno indica che la forza su m è diretta verso il centro della Terra, in verso opposto a quello di $\hat{r}$. La stessa espressione si può usare per descrivere la forza gravitazionale agente su una massa m in prossimità di altri corpi pesanti, come la Luna, un pianeta o il Sole; in questi casi M_T deve essere sostituito dalla massa del corpo considerato.

Supponiamo che una particella di massa m si muova da una posizione a un'altra lungo una traiettoria arbitraria (**Figura 8.19**), con il risultato che la sua distanza dal

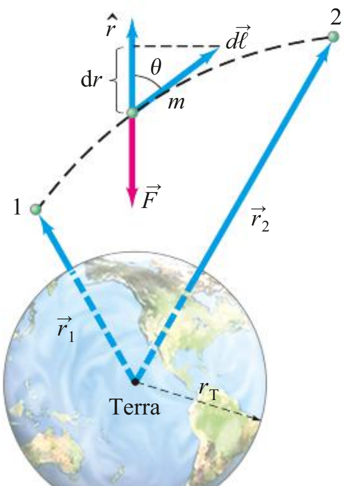


Figura 8.19 Traiettoria arbitraria di una particella di massa m che si sposta dal punto 1 al punto 2.

[2] Abbiamo scritto $r > r_T$, dove r_T è il raggio della Terra, perché questa equazione si applica solo al di là della superficie terrestre. All'interno della Terra, le cose sono un po' più complicate: *vedi* l'Appendice E.

 ISBN 978-88-08-29994-9

centro della Terra cambi da r_1 a r_2. Il lavoro compiuto dalla forza gravitazionale è dato allora da

$$W = \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{\ell} = -GmM_T \int_1^2 \frac{\hat{r} \cdot d\vec{\ell}}{r^2},$$

dove $d\vec{\ell}$ rappresenta lo spostamento infinitesimo. Visto che $\hat{r} \cdot d\vec{\ell} = dr$ rappresenta la componente di $d\vec{\ell}$ nella direzione di $\hat{r}$ (*vedi* Figura 8.19), allora

$$W = -GmM_T \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = GmM_T \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right),$$

o, equivalentemente

$$W = \frac{GmM_T}{r_2} - \frac{GmM_T}{r_1}.$$

Poiché l'integrale dipende solo dalla posizione iniziale e da quella finale (r_1 e r_2) e non dalla traiettoria seguita, la forza gravitazionale è una forza conservativa. Possiamo di conseguenza introdurre per questa forza il concetto di energia potenziale. Dal momento che la variazione dell'energia potenziale è sempre definita (par. 8.2) come il lavoro, cambiato di segno, compiuto dalla forza, abbiamo

$$\Delta U = U_2 - U_1 = -\frac{GmM_T}{r_2} + \frac{GmM_T}{r_1}. \qquad (8.16)$$

Dall'Equazione 8.16 deriva che l'energia potenziale a una distanza generica r dal centro della Terra può essere scritta come:

$$U(r) = -\frac{GmM_T}{r} + C,$$

con C costante arbitraria. È consuetudine scegliere $C = 0$, e quindi

$$U(r) = -\frac{GmM_T}{r}. \qquad [\text{gravità, } r > r_T] \quad (8.17)$$

Come conseguenza della scelta che abbiamo fatto per C, si ha $U = 0$ per $r = \infty$. L'energia potenziale di una particella che si avvicina alla Terra diminuisce ed è sempre negativa (**Figura 8.20**).

L'Equazione 8.16 si riduce all'Equazione 8.2, $\Delta U = mg(y_2 - y_1)$, per particelle che si trovino in prossimità della superficie terrestre.

L'energia di una particella di massa m si conserva se la particella è soggetta esclusivamente alla forza di gravità, che è una forza conservativa. Possiamo, dunque, scrivere

$$\frac{1}{2}mv_1^2 - G\frac{mM_T}{r_1} = \frac{1}{2}mv_2^2 - G\frac{mM_T}{r_2} = \text{ costante}$$

$$[\text{agisce la sola forza di gravità}] \quad (8.18)$$

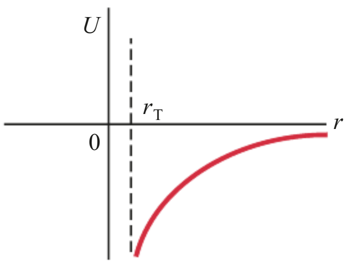


Figura 8.20 Energia potenziale gravitazionale in funzione di r, distanza dal centro della Terra. Questa rappresentazione è valida solo per punti per i quali $r > r_T$, il raggio della Terra.

ESEMPIO 8.12

Pacco lasciato cadere da un razzo ad alta velocità

Un pacco di massa m viene lasciato cadere da un razzo che si allontana dalla Terra con una velocità di 1800 m/s quando si trova 1600 km al di sopra della superficie terrestre. Il pacco alla fine arriva sulla Terra. Fornite una stima della sua velocità di impatto. Trascurate la resistenza dell'aria.

ISBN 978-88-08-29994-9

APPROCCIO Usiamo il principio di conservazione dell'energia. Il pacco inizialmente possiede una velocità relativa alla Terra uguale a quella del razzo da cui viene lasciato cadere.

SOLUZIONE La conservazione dell'energia è espressa in questo caso dall'Equazione 8.18:

$$\frac{1}{2}mv_1^2 - G\frac{mM_T}{r_1} = \frac{1}{2}mv_2^2 - G\frac{mM_T}{r_2}$$

dove $v_1 = 1.80 \times 10^3$ m/s, $r_1 = (1.60 \times 10^6 \text{ m}) + (6.38 \times 10^6 \text{ m}) = 7.98 \times 10^6$ m e $r_2 = 6.38 \times 10^6$ m (il raggio della Terra). Risolviamo rispetto a v_2 e otteniamo:

$$v_2 = \sqrt{v_1^2 - 2GM_T\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)}$$

$$= \sqrt{(1.80 \times 10^3 \text{ m/s})^2 - 2(6.67 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2)(5.98 \times 10^{24} \text{ kg}) \times \left(\frac{1}{7.98 \times 10^6 \text{ m}} - \frac{1}{6.38 \times 10^6 \text{ m}}\right)}$$

$$= 5320 \text{ m/s}.$$

NOTA Nella realtà la velocità sarebbe vistosamente minore del valore calcolato a causa della resistenza dell'aria. Osserviamo, inoltre, che direzione e verso della velocità non sono stati considerati nel calcolo, e questo è uno dei vantaggi del metodo dell'energia. Il razzo avrebbe potuto puntare verso la Terra o in verso opposto, o in qualunque altra direzione, e il risultato sarebbe stato lo stesso.

Velocità di fuga

Un corpo lanciato in aria dalla Terra ricade sulla superficie terrestre, a meno che non venga lanciato con una velocità sufficientemente elevata. Se la velocità è maggiore di un certo valore, il corpo continuerà ad allontanarsi nello spazio senza fare mai ritorno sulla Terra (al netto di altre forze o collisioni). La velocità iniziale minima necessaria a far sì che un corpo lanciato in aria non ricada sulla Terra è chiamata **velocità di fuga** dalla Terra, v_f. Per calcolare v_f (trascurando la resistenza dell'aria), usiamo l'Equazione 8.18 con $v_1 = v_f$ e $r_1 = r_T = 6.38 \times 10^6$ m, il raggio della Terra. Visto che stiamo cercando la velocità minima per sfuggire dalla Terra, imponiamo che il corpo arrivi a $r_2 = \infty$ con velocità nulla, $v_2 = 0$. Applicando l'Equazione 8.18 abbiamo

$$\frac{1}{2}mv_f^2 - G\frac{mM_T}{r_T} = 0 + 0$$

da cui

$$v_f = \sqrt{2GM_T / r_T} = 1.12 \times 10^4 \text{ m/s} \tag{8.19}$$

o 11.2 km/s. È importante osservare che, anche se una massa può sfuggire dalla Terra (o dal sistema solare) senza farvi mai ritorno, la forza su di essa dovuta al campo gravitazionale terrestre (che è proporzionale a $1/r^2$) non è mai zero per qualunque valore finito di r.

ESEMPIO 8.13

Scappare dalla Terra o dalla Luna

(*a*) Confrontate le velocità di fuga dalla Terra e dalla Luna per un razzo. (*b*) Confrontate le energie richieste per lanciare il razzo. Per la Luna, $M_L = 7.35 \times 10^{22}$ kg e $r_L = 1.74 \times 10^6$ m, e per la Terra, $M_T = 5.98 \times 10^{24}$ kg e $r_T = 6.38 \times 10^6$ m.

APPROCCIO Usiamo l'Equazione 8.19, sostituendo M_T e r_T con M_L e r_L per calcolare v_f dalla Luna.

SOLUZIONE (*a*) Usando l'Equazione 8.19, il rapporto tra le velocità di fuga risulta essere

$$\frac{v_f(\text{terra})}{v_f(\text{luna})} = \sqrt{\frac{M_T}{M_L}\frac{r_L}{r_T}} = 4.7.$$

Per sfuggire all'attrazione terrestre è necessaria una velocità 4.7 volte superiore a quella necessaria per sfuggire all'attrazione della Luna.

(*b*) Il combustibile che deve essere bruciato fornisce energia proporzionale a v^2 ($K = 1/2\,mv^2$); per lanciare un razzo che deve lasciare la Terra è necessaria un' energia $(4.7)^2 = 22$ volte superiore a quella che sarebbe necessaria al razzo per lasciare la Luna.

8.8 Potenza

La **potenza** è definita come il *ritmo con cui viene compiuto lavoro*. La **potenza media**, $\bar{P}$, è uguale al lavoro compiuto W diviso il tempo, t, impiegato a compierlo:

$$\bar{P} = \frac{W}{t}. \tag{8.20a}$$

La **potenza istantanea**, P, è

$$P = \frac{dW}{dt}. \tag{8.20b}$$

Il lavoro compiuto in un processo è uguale all'energia trasferita da un corpo a un altro. Per esempio, mentre l'energia potenziale immagazzinata nella molla della Figura 8.6c si trasforma in energia cinetica della palla, la molla compie lavoro sulla palla. Analogamente, quando lanciate una palla o spingete il carrello della spesa, *ogni volta che si compie lavoro, si trasferisce dell'energia da un corpo a un altro.*

Possiamo dunque definire la potenza media anche come il *ritmo con cui l'energia si trasforma*:

$$\bar{P} = \frac{W}{t} = \frac{\text{energia trasformata}}{\text{tempo}},$$

e la potenza istantanea

$$P = \frac{dE}{dt}. \tag{8.20c}$$

La classificazione in base alla potenza di un motore si riferisce alla quantità di energia chimica o elettrica che esso può trasformare in energia meccanica nell'unità di tempo. In unità SI, la potenza si misura in joule al secondo, unità di misura che prende il nome di **watt** (W): 1 W = 1 J/s. Probabilmente abbiamo più familiarità con il watt nel caso dei dispositivi elettrici, per i quali rappresenta il ritmo con cui una lampada a incandescenza o una stufa elettrica trasformano energia elettrica in luce o energia termica. Il watt, però, si riferisce anche a trasformazioni di energia di altro tipo. Nel sistema britannico, l'unità di misura della potenza è il piede-libbre al secondo (ft · lb/s). Per scopi pratici, tuttavia, si usa un'unità di misura maggiore, il **cavallo-vapore**. Un cavallo-vapore[3] (hp) è definito come 550 ft · lb/s, che è uguale a 746 watt. La potenza di un motore è generalmente indicata in hp o in kW (1 kW ≈ 1.3 hp).

[3] Il cavallo-vapore fu definito da James Watt (1736-1819), che aveva bisogno di esprimere la potenza delle sue macchine a vapore appena sviluppate. Egli misurò sperimentalmente che un buon cavallo può lavorare tutto il giorno con un ritmo medio di 360 ft · lb/s. Per non essere accusato di esagerare nella vendita delle sue macchine a vapore, quando definì il cavallo-vapore moltiplicò questo numero per 1.5.

Consideriamo un esempio che mette bene in evidenza la distinzione tra potenza ed energia. Il limite nel lavoro che una persona può compiere è costituito non solo dall'energia totale richiesta, ma anche dalla rapidità di trasformazione di questa energia: cioè, dalla potenza. Per esempio, una persona può essere in grado di camminare per una lunga distanza o salire diverse rampe di scale prima di avere necessità di fermarsi per aver speso troppa energia. D'altro canto, una persona che sale le scale di corsa può sentirsi esausta anche solo dopo una rampa o due. In questo caso il suo limite è dato dalla potenza, il ritmo col quale il suo corpo può trasformare energia chimica in energia meccanica.

Figura 8.21 Esempio 8.14.

ESEMPIO 8.14

Potenza per salire le scale

Una persona di 60 kg, mentre fa *jogging,* sale su una lunga rampa di scale in 4.0 s (**Figura 8.21**). L'altezza della rampa è di 4.5 m. (*a*) Fornite una stima della potenza impegnata dalla persona in watt e in cavalli-vapore. (*b*) Quanta energia è richiesta?

APPROCCIO La persona compie lavoro contro la gravità, pari a $W = mgy$. Per calcolare la potenza media, dividiamo W per il tempo impiegato.

SOLUZIONE (*a*) La potenza media impegnata è

$$\overline{P} = \frac{W}{t} = \frac{mgy}{t} = \frac{(60\ \mathrm{kg})(9.8\ \mathrm{m/s^2})(4.5\ \mathrm{m})}{4.0\ \mathrm{s}} = 660\ \mathrm{W}.$$

Poiché ci vogliono 746 W per fare 1 hp, la persona compie lavoro con un ritmo di poco inferiore a 1 hp. Una persona non può compiere lavoro con un ritmo simile per un tempo prolungato.

(*b*) L'energia richiesta è $E = \overline{P}t = (660\ \mathrm{J/s})(4.0\ \mathrm{s}) = 2600\ \mathrm{J}$. Questo risultato è uguale a $W = mgy$.

NOTA La persona deve trasformare più energia dei 2600 J. L'energia totale trasformata da una persona, come anche da un motore, deve comprendere sempre una frazione di energia termica (basta pensare al caldo che si sente quando si salgono le scale).

FISICA APPLICATA
Potenza necessaria a un'auto

Le automobili compiono lavoro per vincere la forza di attrito (e la resistenza dell'aria), per salire sulle strade in pendenza e per accelerare. Il ritmo con cui un'automobile può compiere lavoro ha un limite. Questa è la ragione per cui i motori delle automobili sono classificati in base ai cavalli-vapore o ai kilowatt. Un'automobile ha bisogno più di potenza quando sale lungo una strada in pendenza e quando accelera. Nel prossimo esempio calcoleremo quanta potenza serve a un'automobile media in situazioni di questo tipo. Anche quando un'automobile percorre una strada in piano, a velocità costante, ha bisogno di una certa potenza per compiere il lavoro necessario a vincere le forze frenanti dovute agli attriti interni e alla resistenza dell'aria. Queste forze dipendono ovviamente dallo stato e dalla velocità dell'automobile; tuttavia, sono in genere comprese nell'intervallo tra 400 N e 1000 N.

È spesso conveniente scrivere la potenza in termini della forza totale $\vec{F}$ applicata al corpo e della sua velocità $\vec{v}$. Dato che $P = \mathrm{d}W/\mathrm{d}t$ e che $\mathrm{d}W = \vec{F}\cdot \mathrm{d}\vec{\ell}$ (Eq. 7.7), abbiamo:

$$P = \frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}t} = \vec{F}\cdot\frac{\mathrm{d}\vec{\ell}}{\mathrm{d}t} = \vec{F}\cdot\vec{v}, \tag{8.21}$$

dove $\mathrm{d}\vec{\ell}/\mathrm{d}t$ rappresenta la velocità dell'oggetto.

 ISBN 978-88-08-29994-9

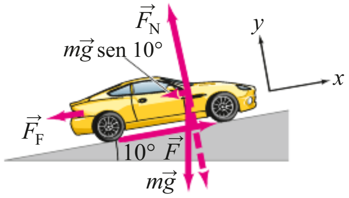


Figura 8.22 Esempio 8.15. Calcolo della potenza necessaria a un'automobile per percorrere una salita.

ESEMPIO 8.15

Potenza necessaria a un'automobile

Calcolate la potenza richiesta da un'automobile di 1400 kg nelle seguenti situazioni: (*a*) l'automobile sta salendo lungo una strada con pendenza di 10° (una salita ripida) con una velocità costante di 80 km/h; (*b*) l'automobile sta accelerando su una strada in piano da 90 a 110 km/h in 6.0 s per superare un'altra automobile. Assumete una forza frenante media sull'automobile F_F = 700 N (**Figura 8.22**).

APPROCCIO Innanzitutto non dobbiamo confondere $\vec{F}_F$, che è dovuta alla resistenza dell'aria e agli attriti che frenano il moto, con la forza $\vec{F}$ necessaria per accelerare l'automobile, che in sostanza è la forza di attrito esercitata dal manto stradale sugli pneumatici – la reazione alla forza esercitata sulla strada dagli pneumatici, messi in movimento dal motore. Per calcolare la potenza dobbiamo prima calcolare questa forza *F*.

SOLUZIONE (*a*) Per il secondo principio della dinamica, l'automobile può salire a velocità costante lungo la strada se esercita una forza *F* uguale alla somma della forza frenante, 700 N, e della componente della gravità nella direzione della salita, *mg* sen 10°. Quindi

$$F = 700\ \text{N} + mg\ \text{sen}\ 10° = 700\ \text{N} + (1400\ \text{kg})(9.80\ \text{m/s}^2)(0.174) = 3100\ \text{N}.$$

Essendo $\bar{v}$ = 80 km/h = 22 m/s[4] e parallela a $\vec{F}$, la potenza è data da (Eq. 8.21)

$$\bar{P} \square F\bar{v} \square (3100\ \text{N})(22\ \text{m/s}) \square 6.80 \times 10^4\ \text{W} \square 68.0\ \text{kW} \square 91\ \text{hp}.$$

(*b*) L'automobile accelera da 25.0 m/s a 30.6 m/s (da 90 a 110 km/h). Essa deve dunque esercitare una forza che superi la forza frenante di 700 N e che fornisca l'accelerazione richiesta:

$$\bar{a}_x = \frac{(30.6\ \text{m/s} - 25.0\ \text{m/s})}{6.0\ \text{s}} = 0.93\ \text{m/s}^2.$$

Applicando il secondo principio della dinamica lungo la direzione *x* del moto:

$$ma_x = \sum F_x = F - F_F.$$

Risolvendo rispetto a *F*:

$$F = ma_x + F_F = (1400\ \text{kg})(0.93\ \text{m/s}^2) + 700\ \text{N} = 1300\ \text{N} + 700\ \text{N} = 2000\ \text{N}.$$

Secondo la relazione $P = \vec{F} \cdot \vec{v}$, la potenza richiesta aumenta con la velocità e il motore deve essere in grado di fornire una potenza massima di

$$\bar{P} \square (2000\ \text{N})(30.6\ \text{m/s}) \square 6.12 \times 10^4\ \text{W} \square 61.2\ \text{kW} \square 82\ \text{hp}.$$

NOTA Prendendo in considerazione il fatto che solo una frazione compresa tra il 60 e l'80% della potenza del motore viene trasmessa alle ruote, è evidente dai calcoli precedenti che un motore di potenza compresa tra 75 kW e 100 kW (tra 100 hp e 130 hp) è adeguato.

[4] 1 km/h = 1000 m/3600 s = 0.278 m/s.

Nell'Esempio 8.15 abbiamo menzionato il fatto che solo una frazione dell'energia del motore di un'automobile viene trasformata in energia motrice. Non accade solo che una parte di energia sia dissipata nel processo di trasmissione alle ruote, ma accade anche che gran parte dell'energia fornita al motore (attraverso il carburante) non venga trasformata in lavoro utile. Una caratteristica importante di tutti i motori è la loro efficienza, *e*, definita come il rapporto tra la potenza utile dal motore, P_{out}, e quella di input fornita al motore, P_{in}:

$$e = \frac{P_{out}}{P_{in}}.$$

L'efficienza è una grandezza sempre minore di 1.0, visto che nessun motore può creare energia e non può neanche trasformare energia senza dissipazione causata da attriti o in energia termica e altre forme non utili. Il motore di un'automobile, per esempio, trasforma l'energia chimica prodotta dalla combustione del carburante in energia meccanica che muove le ruote. Circa l'85% dell'energia fornita al motore, tuttavia, è "dissipata" sotto forma di energia termica, che passa nel radiatore o viene espulsa attraverso la marmitta, oltre che per l'attrito delle parti in movimento. I motori delle automobili sono quindi efficienti solo per il 15% circa. L'efficienza è trattata in maniera più dettagliata nel Capitolo 20.

8.9 Diagrammi dell'energia potenziale; equilibrio stabile e instabile

Se su un corpo compiono lavoro solo forze conservative, possiamo sapere molto del suo moto anche solo esaminando il diagramma dell'energia potenziale: il grafico di $U(x)$ in funzione di x. Un esempio di diagramma di questo tipo è quello riportato nella **Figura 8.23**. Si tratta di una curva complessa che rappresenta una funzione energia potenziale $U(x)$ complicata. L'energia totale $E = K + U$ è costante e può essere rappresentata sul grafico mediante una linea orizzontale. Sono mostrati quattro differenti valori di E, indicati con E_0, E_1, E_2 ed E_3. Il valore di E che un sistema possiede dipende dalle condizioni iniziali (per esempio, l'energia totale E di una massa che oscilla all'estremità di una molla dipende da quanto la molla è stata compressa o allungata all'inizio). L'energia cinetica $K = 1/2\, mv^2$ non può essere negativa (v sarebbe un numero immaginario), ed essendo $E = K + U$ = costante, $U(x)$ deve essere sempre minore o uguale a E: $U(x) \le E$. Per l'energia potenziale rappresentata nella Figura 8.23, il più piccolo valore possibile per l'energia totale è E_0. Per questo valore di E, in $x = x_0$ la massa può trovarsi solo a riposo. Il sistema in questa posizione può avere solo energia potenziale e non energia cinetica.

Se l'energia totale E del sistema è maggiore di E_0, per esempio E_1 nel nostro grafico, il sistema può possedere sia energia cinetica sia energia potenziale. Dovendo l'energia essere conservata, per ogni dato x vale

$$K = E - U(x).$$

Poiché la curva rappresenta $U(x)$ per ogni x, l'energia cinetica per un dato x è data dalla distanza tra la linea che rappresenta E e la curva che rappresenta $U(x)$ in corrispondenza di questo valore di x. Nel diagramma, l'energia cinetica per un corpo in x_1, quando la sua energia totale è E_1, è indicata come K_1.

Un corpo con energia E_1 può solo oscillare tra i punti x_2 e x_3. Per i punti con $x > x_2$ oppure $x < x_3$, infatti, l'energia potenziale sarebbe maggiore di E, implicando $K = 1/2\, mv^2 < 0$ con v numero immaginario, e questo è impossibile. In x_2 e x_3 la velocità si annulla, poiché in questi punti $E = U$. Per questo motivo x_2 e x_3 sono chiamati **punti di inversione** del moto. Se il corpo si trova, per esempio, in x_0 e si

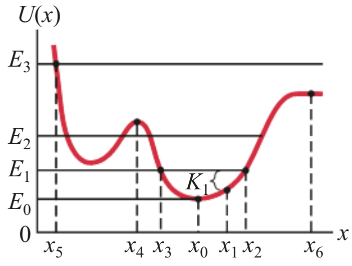


Figura 8.23 Un diagramma dell'energia potenziale.

 ISBN 978-88-08-29994-9

che l'attrazione gravitazionale di Giove sia prossima allo zero; il simbolo (′), come nel caso di $\vec{v}'_{G0}$, indica la velocità *dopo* che la navicella ha superato Giove, *dopo* l'avvenuto incontro.

Successivamente guardiamo lo stesso fenomeno ponendoci nel *sistema di riferimento del Sole* (e del Sistema solare nel suo insieme). La **Figura 8.25b** mostra Giove che si muove verso destra, con velocità $\vec{u}$, nella sua orbita attorno al Sole, lungo l'asse x.[6] Lontano da Giove, la nostra navicella ha velocità v_0 (Figura 8.25b, parte inferiore) e accelera a causa della gravità di Giove, mentre possiede una velocità $\vec{v}$ nel punto di massimo avvicinamento a Giove. Successivamente, lontano da Giove (in alto a destra), la navicella ha velocità $v'_0(> v_0)$, come mostrato in figura. Ispezionate attentamente le componenti della velocità mostrate nella Figura 8.25b e notate che v_{G0x} e v_{0x} sono negative perché puntano lungo l'asse x negativo.

Calcoliamo la variazione di energia cinetica della sonda dovuta al suo incontro con Giove. Vogliamo farlo nel nostro sistema di riferimento del Sistema solare, Figura 8.25b. Per prima cosa dobbiamo guardare alle componenti x della velocità del veicolo spaziale (le componenti y non cambiano). La componente x "finale" della velocità della navicella, v'_{0x}, nei termini della velocità di entrata "iniziale", v_{0x}, è uguale al suo valore nel riferimento di Giove (G) più la velocità relativa u fra i due sistemi di riferimento:

$$\begin{aligned} v'_{0x} &= v'_{G0x} + u \\ &= -v_{G0x} + u && \text{[parte superiore della Figura 8.25a]} \\ &= -(v_{0x} - u) + u = -v_{0x} + 2u && \text{[parte inferiore della Figura 8.25b]} \end{aligned} \tag{8.22}$$

come mostrato nella parte superiore della Figura 8.25b. Il pedice G si riferisce al sistema di riferimento di Giove; i pedici ($_0$) e ($'_0$) si riferiscono alla navicella lontana da Giove prima e dopo l'incontro. La variazione dell'energia cinetica è data da

$$\begin{aligned} \Delta K &= \frac{1}{2}m(v'^2_{0x} + v^2_{0y}) - \frac{1}{2}m(v^2_{0x} + v^2_{0y}) \\ &= \frac{1}{2}m(v^2_{0x} - 4uv_{0x} + 4u^2 - v^2_{0x}) = 2mu(u - v_{0x}). \end{aligned} \tag{8.23}$$

Questo risultato, Equazione 8.23, fornisce un aumento dell'energia cinetica del veicolo spaziale dato $v_{0x} < 0$ (Figura 8.25b, in basso). L'energia è conservata perché il pianeta (G) subisce una perdita uguale di energia cinetica, che influenza il movimento del pianeta in modo impercettibile a causa della sua enorme massa.

Se si *vuole rallentare* un'astronave (magari per metterla in orbita attorno a un pianeta o una luna), essa dovrà essere lanciata in modo che passi *davanti* al pianeta (G) e che v_{0x} sia nella *stessa* direzione di $\vec{u}$ (> 0) e con magnitudo maggiore di u (*vedi* il Problema 77).

La **Figura 8.25c** mostra la traiettoria della sonda Voyager, lanciata nel 1977 quando i pianeti Giove, Saturno, Urano e Nettuno erano in posizioni ottimali per fornire ciascuno un "assist" alla sonda, un allineamento raro che non si ripeterà fino al XXII secolo. Dopo tutti questi decenni, Voyager è ancora in grado di fornirci dei dati. Ora si trova oltre il Sistema solare ed è entrata nello spazio interstellare!

[6] In generale, la velocità $\vec{u}$ in Figura 8.25b può avere anche una componente y. L'abbiamo scelta lungo l'asse x così da mantenere la matematica più semplice per far sì che l'effetto della fionda gravitazionale sia immediatamente visibile.

ISBN 978-88-08-29994-9

▶ Sommario

Una forza che per spostare un corpo da una posizione a un'altra compie un lavoro che dipende solo dalle due posizioni e non dal percorso seguito si dice **forza conservativa**. Il lavoro compiuto da una forza conservativa è recuperabile. Questo non è vero per una forza non conservativa, come la forza di attrito.

L'**energia potenziale**, U, è l'energia associata alle forze conservative e dipende dalla posizione o dalla configurazione dei corpi. L'energia potenziale gravitazionale è uguale a

$$U_{\text{grav}} = mgy, \tag{8.3}$$

dove la massa m si trova in prossimità della superficie terrestre, a una quota y rispetto a un qualche punto di riferimento. L'energia potenziale elastica è data da

$$U_{\text{el}} = \frac{1}{2}kx^2 \tag{8.5}$$

per una molla con costante elastica k allungata o compressa di una quantità x rispetto alla lunghezza di equilibrio, o di riposo. Altre forme di energia potenziale sono l'energia chimica, l'energia elettrica e l'energia nucleare.

L'energia potenziale è sempre associata a una forza conservativa; la variazione dell'energia potenziale, ΔU, tra due punti, quando agisce una forza conservativa $\vec{F}$, è definita come il lavoro compiuto da questa forza, cambiato di segno:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = -\int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{\ell}. \tag{8.4}$$

Invertendo, possiamo scrivere, nel caso unidimensionale,

$$F = -\frac{dU(x)}{dx}. \tag{8.7}$$

Solo le *variazioni* dell'energia potenziale hanno un significato fisico, e quindi la posizione in cui $U = 0$ può essere scelta arbitrariamente dove è più conveniente. L'energia potenziale non è una proprietà di un corpo, ma è associata all'interazione di due o più corpi.

Quando agiscono solo forze conservative, l'**energia meccanica** totale, E, definita come la somma delle energie cinetica e potenziale, si conserva:

$$E = K + U = \text{costante} \tag{8.10}$$

Se agiscono anche forze non conservative, entrano in gioco altre forme di energia, come l'energia termica. È stato stabilito sperimentalmente che, quando si considerano tutte le forme di energia, l'energia totale si conserva. Questo risultato costituisce il **principio di conservazione dell'energia**:

$$\Delta K + \Delta U + \Delta\,(\text{altre forme di energia}) = 0 \tag{8.14}$$

La forza gravitazionale, così come è descritta dalla legge di gravitazione universale di Newton, è una forza conservativa. L'energia potenziale di una particella di massa m dovuta alla forza gravitazionale esercitata su di essa dalla Terra è data da

$$U(r) = -\frac{GmM_T}{r}, \tag{8.17}$$

dove M_T è la massa della Terra e r è la distanza della particella dal centro della Terra ($r \geq$ raggio della Terra).

La **potenza** è definita come il ritmo con il quale viene compiuto del lavoro o il ritmo con il quale l'energia è trasformata da una forma a un'altra:

$$P = \frac{dW}{dt} = \frac{dE}{dt}, \tag{8.20}$$

oppure

$$P = \vec{F} \cdot \vec{v}. \tag{8.21}$$

Nel Sistema Internazionale l'unità di misura della potenza è il **watt** (1 W = 1 J/s).

▶ Quesiti

1. Fate un elenco di alcune forze non conservative che potete incontrare nella vita quotidiana, cercate di spiegare perché non sono conservative.

2. Spostate un libro pesante da un tavolo a una mensola posta in alto. Elencate le forze che possono agire sul libro durante lo spostamento, per ciascuna cercate di stabilire se è conservativa o non conservativa.

3. Analizzate il moto oscillatorio di un pendolo semplice in termini di energia, (*a*) trascurando l'attrito e (*b*) prendendolo in considerazione. Spiegate perché un grande orologio a pendolo deve essere ricaricato.

4. Spiegate esattamente che cosa c'è di "sbagliato" dal punto di vista fisico nel famoso disegno di Escher mostrato nella **Figura 8.26**.

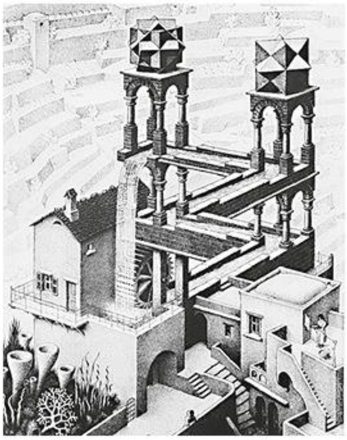


Figura 8.26 Quesito 4.

 ISBN 978-88-08-29994-9

5. Una molla a spirale di massa m è poggiata su un tavolo in posizione verticale. Se comprimete la molla con la mano e poi la lasciate, è possibile che la molla si stacchi dal tavolo? Fornite una spiegazione ricorrendo al principio di conservazione dell'energia.

6. Gli escursionisti esperti preferiscono scavalcare un tronco caduto lungo il loro percorso piuttosto che salirci sopra e saltare giù dall'altra parte. Datene una spiegazione.

7. (*a*) Qual è l'origine dell'energia cinetica di un'automobile quando essa accelera uniformemente partendo da ferma? (*b*) Come è legato l'aumento dell'energia cinetica alla forza di attrito che la strada esercita sugli pneumatici?

8. Può accadere che l'energia meccanica totale, $E = K + U$, sia negativa? Date una spiegazione.

9. Descrivete le trasformazioni che subisce l'energia quando un bambino, sopra un canguro a molla, saltella qua e là.

10. (*a*) In questo capitolo sono state discusse solo due forze conservative. Quali e come vanno trattate quando si ha a che fare con la conservazione dell'energia? (*b*) Non abbiamo discusso della forza che l'acqua esercita su un nuotatore. Essa è conservativa o non conservativa?

11. Nel Capitolo 4, Esempio 4.14, abbiamo visto che si possono utilizzare puleggia e funi per ridurre la forza necessaria a sollevare un carico pesante (**Figura 8.27**). Per ogni metro di sollevamento del carico, quanta fune deve essere tirata? Fate le vostre considerazioni ricorrendo al concetto di energia.

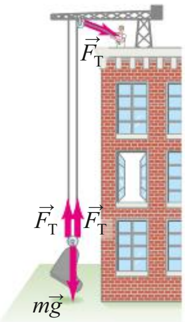


Figura 8.27 Quesito 11.

12. Due frecce identiche, una con velocità doppia dell'altra, sono lanciate verso una balla di fieno. Assumendo che il fieno eserciti una forza "di attrito" costante sulle frecce, possiamo affermare che sarà la freccia più veloce a penetrare più in profondità? Spiegate la risposta.

13. Nella **Figura 8.28** alcuni palloncini pieni d'acqua sono lanciati in aria dal tetto di un edificio, sono lanciati tutti con la stessa velocità ma con angoli differenti. Qual è il palloncino che arriva al suolo con la velocità più alta? Trascurate la resistenza dell'aria.

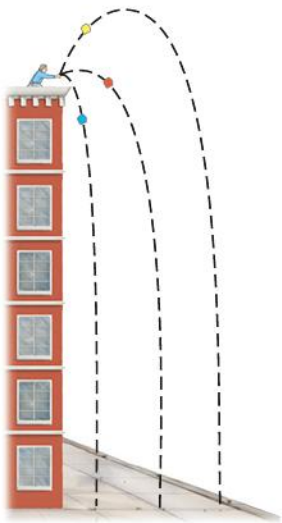


Figura 8.28 Quesito 13.

14. Supponete di voler lanciare un razzo dalla superficie terrestre e volete che esso sfugga al campo gravitazionale della Terra. Per questa operazione volete usare la minima quantità di carburante. Da quale punto della superficie terrestre dovreste effettuare il lancio e in quale direzione? Sono veramente importanti la posizione e la direzione di lancio? Date una spiegazione.

15. Supponete di dover sollevare una valigia dal pavimento fin sopra un tavolo. Il lavoro compiuto dipenderà: (*a*) dal fatto che solleviate la valigia esattamente lungo la verticale o che la solleviate seguendo un percorso più complesso; (*b*) dal tempo che impiegate a sollevare la valigia; (*c*) dall'altezza del tavolo; (*d*) dal peso della valigia.

16. Rispondete alla stessa domanda del Quesito 15 sostituendo al lavoro la *potenza* necessaria.

17. Perché è più facile salire in cima a una montagna seguendo un percorso a zig-zag piuttosto che uno in linea retta?

18. Un pendolo è messo in movimento, a partire da un punto che si trova a una quota h rispetto al punto più basso della sua traiettoria, in due modi differenti (**Figura 8.29**). Per entrambi, il modulo della velocità iniziale è lo stesso e vale 3.0 m/s. Nel primo lancio, la velocità iniziale è diretta verso l'alto lungo la traiettoria, mentre nel secondo lancio la velocità è diretta nel verso opposto. Per quale dei due lanci il pendolo passa con una velocità maggiore nel punto più basso della sua oscillazione? Date una spiegazione.

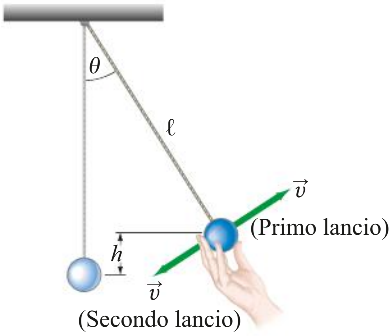


Figura 8.29 Quesito 18.

19. La **Figura 8.30** mostra una curva di energia potenziale, $U(x)$. (*a*) In quale punto la forza ha modulo maggiore? (*b*) Per ciascun punto indicato, stabilite se la forza agisce verso sinistra o verso destra oppure è nulla. (*c*) Quali sono punti di equilibrio e di che tipo?

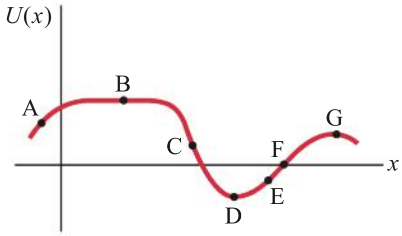


Figura 8.30 Quesito 19.

20. (*a*) Descrivete dettagliatamente le variazioni della velocità di una particella che possiede l'energia E_3 nella Figura 8.23 quando si muove tra x_6 e x_5 e torna indietro verso x_6. (*b*) Dove la sua energia cinetica è massima e dove è minima? Fornite una spiegazione.

ISBN 978-88-08-29994-9

Quesiti e convinzioni errate

1. Una palla da bowling viene lasciata cadere da un'altezza *h* al centro di un trampolino elastico, che la rilancia di nuovo in aria. Quanto in alto si solleverà la palla?
(*a*) Un valore significativamente inferiore a *h*.
(*b*) Più di *h*. La quantità esatta dipende dalla massa della palla e dall'elasticità del trampolino.
(*c*) Non più di *h*: probabilmente un po' meno.
(*d*) Non è possibile dirlo senza conoscere le caratteristiche del trampolino.

2. Una palla viene lanciata verso l'alto. A che punto la palla possiede maggiore energia? Trascurate la resistenza dell'aria.
(*a*) Nel punto più alto del suo percorso.
(*b*) Quando viene lanciata per la prima volta.
(*c*) Appena prima che tocchi il suolo.
(*d*) Quando la palla è a metà strada rispetto al punto più alto del suo percorso.
(*e*) Ovunque; l'energia della palla è la stessa in tutti i punti.

3. Un uomo spinge un blocco su un pendio a velocità costante. Mentre il blocco si muove su per il pendio,
(*a*) la sua energia cinetica e la sua energia potenziale aumentano entrambe.
(*b*) la sua energia cinetica aumenta mentre la sua energia potenziale rimane la stessa.
(*c*) la sua energia potenziale aumenta mentre la sua energia cinetica rimane la stessa.
(*d*) la sua energia potenziale aumenta mentre la sua energia cinetica diminuisce della stessa quantità.

4. Mentre una ragazza su uno skateboard sale lungo una collina e rallenta, la ragazza
(*a*) guadagna energia cinetica (energia di movimento).
(*b*) guadagna energia potenziale gravitazionale (energia di posizione).
(*c*) perde tutta la sua energia iniziale.
(*d*) non può perdere energia cinetica perché l'energia rimane costante.

5. Una palla viene lanciata verso l'alto. Trascurando la resistenza dell'aria, quale delle seguenti affermazioni *non* è vera riguardo l'energia della palla?
(*a*) L'energia potenziale diminuisce mentre la palla si alza.
(*b*) L'energia cinetica diminuisce mentre la palla sale.
(*c*) La somma dell'energia cinetica e dell'energia potenziale è costante.
(*d*) L'energia potenziale diminuisce mentre la palla sta scendendo.
(*e*) L'energia cinetica aumenta mentre la palla sta scendendo.

6. Due palline vengono lanciate da un edificio con la stessa velocità, una verso l'alto in direzione perpendicolare e l'altra con un angolo di 45°. Quale affermazione è vera se la resistenza dell'aria può essere ignorata?
(*a*) Entrambe toccano il suolo contemporaneamente.
(*b*) Entrambe colpiscono il suolo con la stessa velocità.
(*c*) Quella lanciata con l'angolo di 45° colpisce il suolo con una velocità inferiore.
(*d*) Quella lanciata con l'angolo di 45° colpisce il suolo con una velocità maggiore.
(*e*) Sia (*a*) che (*b*) sono vere.

7. Uno sciatore parte da fermo dalla cima di ciascuna delle colline mostrate in **Figura 8.31**. Per quale collina lo sciatore possiederà la maggiore velocità una volta arrivato in fondo se ignoriamo l'attrito: (*a*), (*b*), (*c*), (*d*) o (*e*) sia *c* che *d*?

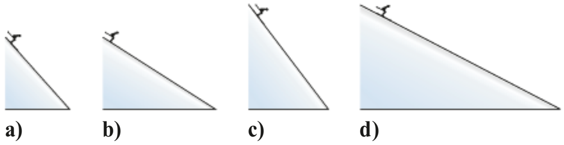


Figura 8.31 Quesiti e convinzioni errate 7 e 8.

8. Rispondi al quesito precedente assumendo la presenza di una piccola quantità di attrito.

9. Un'altalena con sopra un bambino viene sollevata di un angolo θ e rilasciata da ferma. Se il bambino sull'altalena rimane immobile (rispetto al sedile dell'altalena), quale sarà l'angolo massimo che l'altalena può raggiungere dall'altra parte? Trascurate la resistenza dell'aria e l'attrito.
(*a*) L'angolo dipende dalla lunghezza dell'oscillazione, che non è specificata.
(*b*) Lo stesso angolo θ.
(*c*) Un angolo inferiore a θ.
(*d*) Un angolo maggiore di θ.

10. Rispondete al quesito precedente, tenendo conto della resistenza dell'aria e/o dell'attrito nel punto di articolazione della catena che sostiene il sedile oscillante.

11. Una persona si trova al centro di un'alta scala, che è appoggiata a un muro. Se si pone $y = 0$ in cima alla scala, l'energia potenziale gravitazionale della persona sarà
(*a*) positiva.
(*b*) negativa.
(*c*) zero.

12. Qual è il lavoro massimo che può fare un motore da 250 W di potenza?
(*a*) Non si può dire: non vengono fornite informazioni sufficienti.
(*b*) 250 J.
(*c*) 0.335 hp.
(*d*) 250 W.
(*e*) Le risposte (*b*), (*c*) e (*d*) sono tutte corrette.

13. È possibile che un sistema abbia energia potenziale negativa?
(*a*) No, perché l'energia cinetica di un sistema deve essere uguale alla sua energia potenziale.
(*b*) No, perché questo non avrebbe alcun significato fisico.
(*c*) Sì, poiché la scelta dello zero dell'energia potenziale è arbitraria.
(*d*) Sì, fintanto che l'energia cinetica è positiva.
(*e*) Sì, fintanto che l'energia totale è positiva.

 ISBN 978-88-08-29994-9

▶ Problemi

8.1 e 8.2 Forze conservative ed energia potenziale

1. (I) Di quanto varia l'energia potenziale gravitazionale di un saltatore con l'asta di 58 kg se il suo centro di massa si alza di 4.0 m durante il salto?

2. (I) Un pallone da basket viene lasciato cadere da un'altezza di 5.0 m e rimbalza a una nuova altezza di 3.0 m. Quanta energia viene persa a causa delle forze non conservative? Fornite la risposta come percentuale dell'energia iniziale.

3. (I) Una molla ha una costante elastica k di 78.0 N/m. Quanto deve essere compressa per immagazzinare 45.0 J di energia potenziale?

4. (II) Un escursionista di 66.5 kg parte da una quota di 1150 m e sale in cima a quota 2660 m. (*a*) Di quanto cambia l'energia potenziale dell'escursionista? (*b*) Quanto vale il lavoro minimo che l'escursionista deve compiere? (*c*) Il lavoro effettivamente compiuto potrebbe essere maggiore? Giustificate la risposta.

5. (II) Se sono necessari 7.5 J di lavoro per allungare una particolare molla di 2.0 cm dalla sua lunghezza di equilibrio, quanto lavoro sarà necessario per allungarla di ulteriori 4.0 cm?

6. (II) Una persona alta 1.60 m solleva un libro di 1.65 kg da terra fino a 2.20 m di altezza. Quanto vale l'energia potenziale del libro rispetto (*a*) a terra, e (*b*) alla testa della persona? (*c*) Come è legato il lavoro compiuto dalla persona alle risposte date nelle parti (*a*) e (*b*)?

7. (II) Una particella è vincolata a muoversi solo lungo l'asse x e su di essa agisce una forza data da $\vec{F}(x) = -\frac{k}{x^3}\hat{i}$ dove k è una costante con le appropriate unità di misura del SI. Ricavate la funzione energia potenziale $U(x)$, nel caso in cui U sia arbitrariamente fissata a zero in $x = 2.0$ m, cioè $U(2.0 \text{ m}) = 0$.

8. *(II) Se $U = 3x^2 + 2xy + 4y^2z$, qual è l'espressione della forza $\vec{F}$?

9. (II) Consideriamo una particolare molla che segue la legge $\vec{F} = (-kx + ax^3 + bx^4)\hat{i}$, dove k, a e b sono delle costanti. (*a*) Si tratta di una forza conservativa? Spiegate perché sì o perché no. (*b*) Se è conservativa, ricavate l'espressione della funzione energia potenziale.

10. (III) La molla nel Problema 9 è allungata di x_0 rispetto alla sua lunghezza di equilibrio. Una massa m è attaccata alla molla e quindi rilasciata. Qual è la velocità di m in (*a*) $x = x_0$, (*b*) $x = x_0/2$ e (*c*) $x = 0$? (*d*) Come si confrontano queste velocità con quelle relative a una molla "ideale", con $a = 0$ e $b = 0$? Spiegate la vostra risposta.

8.3 e 8.4 Conservazione dell'energia meccanica

11. (I) Una sciatrice principiante, partendo da ferma, scende lungo una pista senza attrito inclinata di 8° e avente un'altezza verticale di 115 m. Qual è la sua velocità quando arriva in fondo?

12. (I) Jane, in cerca di Tarzan, mentre sta correndo a velocità elevata (5.0 m/s) afferra una liana che pende da un alto albero nella giungla. Quale altezza può raggiungere Jane? La risposta è influenzata dalla lunghezza della liana?

13. (II) A una slitta viene impressa una spinta iniziale lungo un piano inclinato di 18.0° privo di attrito. Essa raggiunge una quota di 1.22 m più in alto rispetto a quella da cui era partita. Con quale velocità iniziale era stata spinta?

14. (II) Nel salto in alto, l'energia cinetica di un atleta è trasformata in energia potenziale gravitazionale senza l'aiuto di un'asta. Con quale velocità minima l'atleta deve staccarsi dalla pista per sollevare il suo centro di massa fino a 2.10 m e scavalcare la sbarra con una velocità di 0.50 m/s?

15. (II) Una molla, di costante elastica $k = 88$ N/m, è appesa verticalmente accanto a un righello. L'estremo libero della molla si trova in corrispondenza della tacca dei 15 cm. Se alla molla viene appesa una massa di 2.5 kg, che può cadere liberamente, con quale tacca del righello sarà allineato l'estremo libero della molla?

16. (II) Una pallina di 0.40 kg è lanciata con una velocità di 7.8 m/s in una direzione che forma un angolo di 36° con l'orizzontale. (*a*) Quanto vale la sua velocità nel punto più alto della traiettoria? (*b*) Quanto arriva in alto? (In *b* usate la conservazione dell'energia).

17. (II) Un'automobile di 1400 kg viaggia in direzione orizzontale con velocità $v = 85$ km/h quando urta un sistema a molla e viene arrestata in una distanza di 2.2 m. Quanto vale la costante elastica del sistema a molla? Trascurate l'energia termica prodotta nella collisione.

18. (II) Un ragazzo di 62 kg si lancia su un tappeto elastico dalla cima di una piattaforma con una velocità di 4.5 m/s rivolta verso l'alto. (*a*) Quanto vale la sua velocità quando tocca il tappeto, posto 2.0 m al di sotto (**Figura 8.32**)? (*b*) Se il tappeto elastico si comporta come una molla di costante elastica 5.8×10^4 N/m, di quanto affonda il ragazzo?

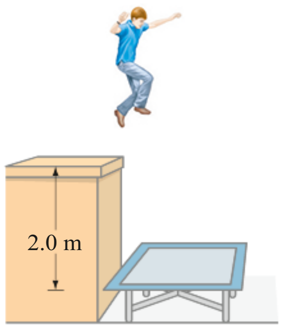


Figura 8.32 Problema 18.

19. (II) Una molla verticale (trascuratene la sua massa), la cui costante elastica è 875 N/m, è fissata a un tavolo ed è compressa di 0.220 m. (*a*) Quale velocità può trasmettere a una pallina di 0.380 kg se la molla viene rilasciata? (*b*) A quale altezza arriverebbe la pallina rispetto alla posizione di partenza (molla compressa)?

20. (II) Il trenino delle montagne russe mostrato nella **Figura 8.33** viene fermato nel punto 1, dove viene poi lasciato, da fermo. Assumendo che non ci sia attrito, calcolate la velocità nei punti 2, 3 e 4.

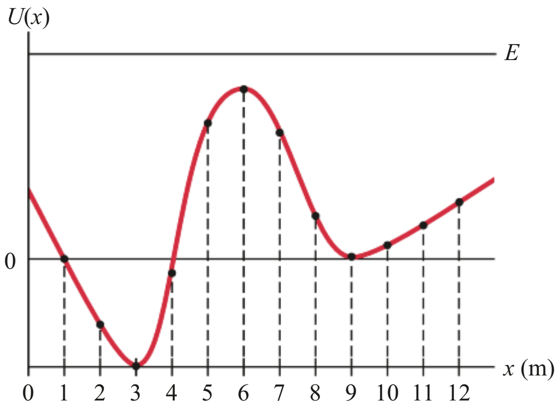


Figura 8.43 Problema 73.

(b) Per quale valore di x l'intensità della forza è minima? (c) Per quale valore di x l'intensità della forza è massima?

74. (III) L'energia potenziale dei due atomi di una molecola biatomica può essere scritta come

$$U(r) = -\frac{a}{r^6} + \frac{b}{r^{12}},$$

dove r è la distanza tra i due atomi e a e b sono costanti positive. (a) In corrispondenza di quali valori di r, $U(r)$ è minima? In quali è massima? (b) Per quali valori di r è $U(r) = 0$? (c) Tracciate un grafico di $U(r)$ in funzione di r nell'intervallo compreso tra $r = 0$ e un valore di r sufficientemente grande da mettere in evidenza le proprietà dei punti a e b. (d) Date una descrizione del moto di uno degli atomi rispetto all'altro quando $E < 0$ e quando $E > 0$. (e) Chiamiamo F la forza che un atomo esercita sull'altro. Per quali valori di r si ha che $F > 0$, $F < 0$, $F = 0$? (f) Calcolare F in funzione di r.

75. (III) L'*energia di legame* di un sistema a due particelle è definita come l'energia richiesta per separare le due particelle a partire dal loro stato di minima energia fino a $r = \infty$. Calcolate l'energia di legame per la molecola dell'Esercizio 74.

76. (III) Una particella si muove in una regione dove la sua energia potenziale è data da $U(r) = U_0\,[(2/r^2) - (1/r)]$. ($a$) Disegnate il diagramma $U(r)$. Dove incrocia il grafico l'asse $U(r) = 0$? Per quale valore di r si avrà il valore minimo di $U(r)$? (b) Supponete che la particella possegga un'energia $E = -0.050\ U_0$. Segnate sul grafico i punti di svolta del moto della particella. Qual è l'energia cinetica massima della particella e per quale valore di r essa si verifica?

*8.10 Fionda gravitazionale

77. *(III) Mostrate che per *rallentare* un veicolo spaziale (magari per metterlo in orbita attorno a un pianeta o una luna) v_{0x} deve essere nella *stessa* direzione e verso di $\vec{u}$ e avere intensità maggiore di u. Mostrate che questo significa che la navicella passerà *davanti* a Giove. In questa situazione disegnate un nuovo diagramma per sostituire la Figura 8.25b.

▶ Problemi generali

78. (a) Una cavalletta di 3.0 g raggiunge una velocità di 3.0 m/s durante il suo salto. Qual è la sua energia cinetica a questa velocità? (b) Se la cavalletta trasforma energia con un'efficienza del 35%, quanta energia è necessaria per il salto?

79. L'acqua che fluisce sopra una diga al ritmo di 320 kg/s cade per 88 m prima di colpire le pale di una turbina. Calcolate (a) la velocità dell'acqua un istante di tempo prima che colpisca la turbina (trascurate la resistenza dell'aria) e (b) il ritmo con cui l'energia meccanica è trasferita alle pale della turbina, considerando un'efficienza del 55%.

80. Un ciclista di 75 kg di massa (inclusa la bicicletta) può scendere, senza pedalare, da una strada in discesa, inclinata di 5.0°, con una velocità costante di 12 km/h. Pedalando forte, il ciclista può scendere dalla stessa strada con una velocità di 32 km/h. A parità di potenza, con quale velocità il ciclista può percorrere la stessa strada in salita? Assumete che la forza di attrito sia proporzionale al quadrato della velocità v; cioè, $F_a = bv^2$, dove b è una costante.

81. Una sciatrice di 55 kg parte da ferma dalla cima di un trampolino per il salto con gli sci (punto A nella **Figura 8.44**), e scende lungo la rampa. Se l'attrito e la resistenza dell'aria possono essere trascurate, (a) calcolate la sua velocità v_B quando raggiunge la base orizzontale della rampa in B. (b) Calcolate la distanza s del punto in cui arriva sulla neve in C.

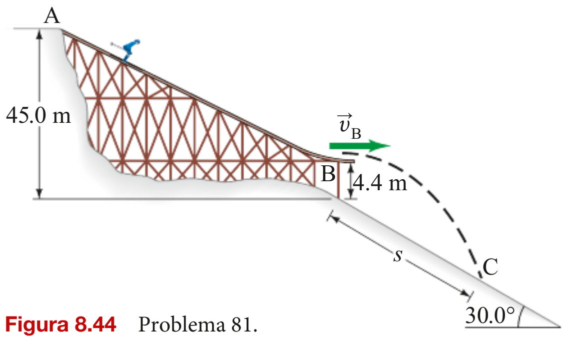


Figura 8.44 Problema 81.

82. Una pallina è attaccata a una corda orizzontale di lunghezza ℓ che ha l'altro estremo fisso, come si vede nella **Figura 8.45**. (a) Se la pallina è lasciata libera, quale sarà la sua velocità nel punto più basso della sua traiettoria? (b) A distanza h direttamente al di sotto dell'estremo

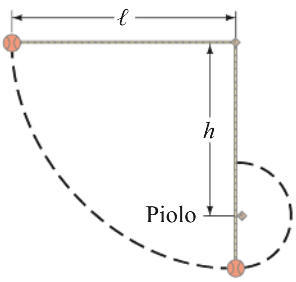


Figura 8.45
Problemi 82 e 83.

 ISBN 978-88-08-29994-9

fisso della corda si trova un piolo. Se $h = 0.80\ \ell$, quale sarà la velocità della pallina nella posizione più alta della sua traiettoria circolare attorno al piolo?

83. Mostrate che h deve essere maggiore di $0.60\ \ell$ se la pallina dell’esercizio della Figura 8.45 deve compiere un giro completo attorno al piolo.

84. Una ciclista ha intenzione di pedalare su una strada in salita, che ha una pendenza di 7.50°, fino a un’altezza di 125 m. I pedali descrivono una circonferenza di 36.0 cm di diametro. Assumendo che la massa totale della bicicletta e della ciclista sia di 75.0 kg, (*a*) calcolate quanto lavoro deve compiere la ciclista contro la gravità. (*b*) Se per ogni giro completo dei pedali la bicicletta avanza di 5.10 m, calcolate la forza media che deve essere applicata ai pedali nella direzione tangente alla circonferenza che descrivono. Trascurate il lavoro della forza di attrito e altre perdite di energia.

85. Se state in piedi su una bilancia pesapersone, la molla all’interno della bilancia si comprime di 0.60 mm e la bilancia indica che il vostro peso è 760 N. Se, invece, saltate sulla bilancia da un’altezza di 1.0 m, qual è il valore massimo indicato? Utilizzate la legge di Hooke.

86. Mostrate che per una montagna russa con un loop circolare verticale (**Figura 8.46**), la differenza del vostro peso apparente (*vedi* il paragrafo 6.4) tra la cima e la base del loop è pari a 6 g: cioè, sei volte il vostro peso. Trascurate l’attrito. Mostrate anche che finché la vostra velocità è superiore a quella minima necessaria, la risposta precedente non dipende né dal raggio del loop né dalla velocità con cui lo affrontate.

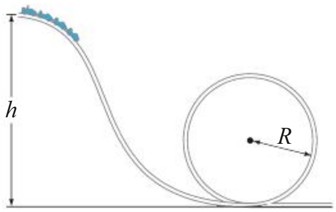


Figura 8.46 Problema 86.

87. Un escursionista di 65 kg sale in cima a una montagna alta 3900 m. L’ascesa dura 4.6 h, partendo da una quota di 2800 m. Calcolate (*a*) il lavoro compiuto dall’escursionista contro la gravità, (*b*) la potenza media spesa in watt e in cavalli-vapore e (*c*) assumendo che il fisico dell’escursionista abbia un’efficienza del 15%, con quale ritmo deve assorbire energia dall’esterno?

88. Considerate una forza $F(x) = Ax^{3/2}$ che agisce su una particella che si muove in linea retta. Supponiamo che $A = 10.0\ \mathrm{N/m}^z$. (*a*) Qual è il valore dell’esponente z? (*b*) Calcolate il lavoro svolto da questa forza quando la particella si sposta da $x = 0$ m a $x = 3.0$ m.

89. Si vuole che la piccola massa m, scivolando senza attrito lungo la guida mostrata nella **Figura 8.47**, rimanga sempre a contatto con la guida, anche nel punto più alto dell’anello di raggio r. (*a*) In termini delle grandezze date, calcolate la minima altezza h da cui la massa deve essere lasciata cadere. Calcolate, poi, per il caso

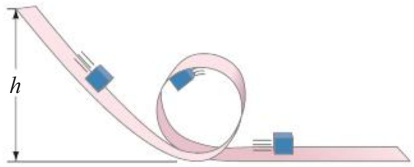


Figura 8.47 Problema 89.

in cui la massa venga lasciata da un’altezza $2h$, la reazione vincolare normale esercitata dalla guida (*b*) nel punto più basso e (*c*) nel punto più alto dell’anello e (*d*) quando la massa percorre il tratto in piano dopo essere uscita dall’anello.

90. Alcune compagnie produttrici di elettricità usano l’acqua per immagazzinare energia. In sostanza l’acqua è pompata mediante pompe a turbina reversibili da un serbatoio più in basso a uno più in alto. Per immagazzinare l’energia prodotta in 1.0 ora da una centrale elettrica da 180 MW, quanti metri cubi di acqua devono essere pompati da un serbatoio all’altro? Considerate che il serbatoio superiore si trovi 380 m più alto di quello inferiore, e che sia possibile trascurare la loro profondità. L’acqua ha una massa di 1.00×10^3 kg per ogni $1.0\ \mathrm{m}^3$ ($1\ \mathrm{MW} = 10^6\ \mathrm{W}$).

91. Una ripresa del famoso salto in lungo di Jesse Owens (**Figura 8.48**) alle Olimpiadi del 1936 mostra che il suo centro di massa si sollevò di 1.1 m dall’inizio del salto al punto più alto della sua traiettoria. Con quale velocità minima spiccò il salto se nel punto più alto aveva una velocità di 6.5 m/s?

Figura 8.48 Problema 91.

92. La forza nucleare tra due neutroni in un nucleo può essere descritta dal potenziale di Yukawa

$$U(r) \square -U_0 \frac{r_0}{r} e^{-r/r_0},$$

dove r rappresenta la distanza tra i neutroni e U_0 e r_0 ($\approx 10^{-15}$ m) sono delle costanti. (*a*) Ricavate l’espressione della forza $F(r)$. (*b*) Quanto vale il rapporto $F(3r_0)/F(r_0)$? (*c*) Calcolate questo stesso rapporto per la forza tra due particelle cariche con $U(r) = -C/r$, con C costante. Perché ci riferiamo alla forza di Yukawa come a una forza “a corto range”?

93. Uno studente di 56 kg, correndo a 6 m/s, si aggrappa a una fune che pende da un albero e si mette a oscillare al di sopra di un lago (**Figura 8.49**). A un certo momento, quando la sua velocità è nulla, lo studente molla la fune.

Fisica 1

Meccanica ▪ Onde ▪ Termodinamica

Terza edizione

L'autore

Douglas C. Giancoli si è laureato in Fisica alla University of California a Berkeley, ha conseguito il Master of Science in Fisica al MIT e il dottorato (PhD) in Fisica delle particelle elementari, sempre a Berkeley. Ha fatto ricerca, sviluppando competenze in Biologia molecolare e in Biofisica, e ha tenuto molti corsi universitari, di taglio sia tradizionale sia innovativo.
È autore anche di *Fisica* (terza edizione, 2017) e *Fisica con Fisica moderna* (terza edizione, 2017), presenti nel catalogo CEA.

Risorse online

A questo indirizzo si può accedere al sito di complemento al libro **online.universita.zanichelli.it/giancolifisica1-3e**

Ebook

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

Esercizi interattivi

Il sistema di esercizi interattivi per studenti e docenti, con classe virtuale.

Per l'accesso registrarsi su **my.zanichelli.it** e abilitare le risorse.
Maggiori informazioni nelle pagine iniziali del libro.

L'accesso all'ebook e alle risorse digitali protette è personale, non condivisibile e non cedibile, né autonomamente né con la cessione del libro cartaceo.

La *Fisica 1* di Giancoli offre una conoscenza approfondita dei concetti base della **meccanica**, incluse le **onde**, e della **termodinamica**, e mostra quanto la fisica sia rilevante nella vita quotidiana per le sue applicazioni alla biologia, alla medicina, all'ingegneria, all'elettronica e all'architettura.

Ogni argomento è introdotto da un'esperienza tratta dalla vita reale collegata ad alcune *domande a scelta multipla*, che includono tra le risposte possibili anche le nozioni preconcette più comuni, da "smontare" nel corso del capitolo. Alle generalizzazioni e agli aspetti più formali si arriva gradualmente, con un approccio che rispecchia il modo in cui la scienza viene praticata.

Molto spazio è dedicato alle tecniche che permettono di risolvere i problemi, un aspetto cruciale nell'apprendimento della fisica:

- nel corso del testo ci sono *Esercizi* da svolgere immediatamente (le soluzioni sono in fondo al capitolo) ed *Esempi* completamente risolti, alcuni dei quali sono *Esempi di stima*, per imparare a ottenere risultati approssimati anche con un numero limitato di informazioni, mentre altri sono *Esempi concettuali*, che pongono domande-chiave su cui ragionare;
- in ogni capitolo sono presenti *Guide alla risoluzione dei problemi*, nelle quali problemi relativi a un determinato argomento sono risolti passo a passo;
- alla fine di ogni capitolo si trovano *Quesiti e convinzioni errate*, cioè test a risposta multipla che offrono alla valutazione anche soluzioni errate spesso basate sul senso comune, e una serie di *Problemi*, alcuni riferiti ai singoli paragrafi e classificati su tre livelli di difficoltà, e altri più impegnativi, chiamati *Problemi generali*.

Gli strumenti matematici più importanti sono introdotti via via dove servono e nelle spiegazioni formali sono inclusi tutti i passaggi. Nelle *Appendici* sono trattati derivate e integrali, oltre ad argomenti più complessi, come l'integrazione numerica, il campo gravitazionale della distribuzione sferica di massa e gli isotopi nucleari, e sono raccolti altri dati utili, fattori di conversione, formule matematiche e la tavola periodica.

GIANCOLI*FISICA 1 3ED (CEA LUMKQ
ISBN 978-88-08-29994-9
9 788808 299949
4 5 6 7 8 9 0 1 (64D)