

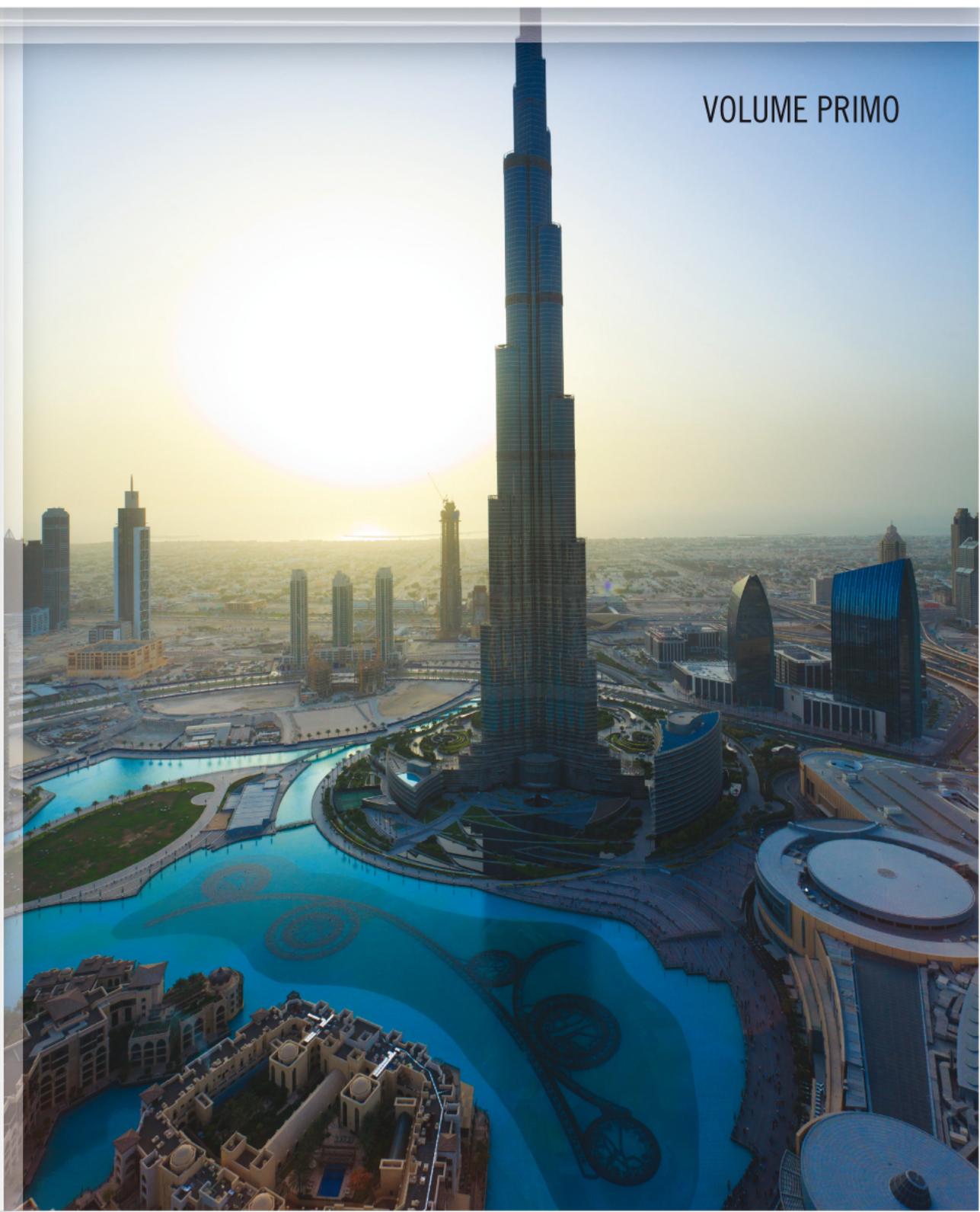
SERWAY • JEWETT

Quinta edizione

Fisica

per Scienze ed Ingegneria

VOLUME PRIMO



Fisica

per Scienze ed Ingegneria

Volume 1

V Edizione

Raymond A. Serway

Emeritus, James Madison University

John W. Jewett, Jr.

Emeritus, California State Polytechnic University, Pomona

Con la collaborazione di Vahé Perroomian,
University of California at Los Angeles



© Ashley Cooper/Corbis



Titolo originale:

Raymond A. Serway and John W. Jewett, Jr.
PHYSICS for Scientists and Engineers - IX ed.
Copyright © 2014, Brooks/Cole Cengage Learning

FISICA per Scienze ed Ingegneria - Volume 1 - V edizione
Copyright © 2015 EdiSES S.r.l. – Napoli

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

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

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

L'Editore

Fotocomposizione:

doma book di Di Grazia Massimo - Napoli

Fotoincisione e stampa:

Tipolitografia Petrucci Corrado & Co. s.n.c.
Zona Ind. Regnano – Città di Castello (PG)

per conto della

EdiSES srl – Piazza Dante, 89 - Napoli

<http://www.edises.it> e-mail: info@edises.it

ISBN 978-88-7959-834-7

Sommario

P A R T E 1 Meccanica 1

- 1 Fisica e misura 2
- 2 Moto in una dimensione 21
- 3 Vettori 59
- 4 Moto in due dimensioni 78
- 5 Le leggi del moto 111
- 6 Il moto circolare ed altre applicazioni delle leggi di Newton 150
- 7 Energia di un sistema 177
- 8 Conservazione dell'energia 211
- 9 Quantità di moto e urti 247
- 10 Rotazione di un corpo rigido attorno ad un asse fisso 293
- 11 Il momento angolare 335
- 12 Equilibrio statico ed elasticità 363
- 13 Gravitazione universale 388
- 14 La meccanica dei fluidi 417

P A R T E 2 Oscillazioni e onde meccaniche 449

- 15 Moto oscillatorio 450
- 16 Moto delle onde 483
- 17 Onde sonore 507
- 18 Sovrapposizione e onde stazionarie 533

P A R T E 3 Termodinamica 567

- 19 Temperatura 568
- 20 Il primo principio della termodinamica 590
- 21 La teoria cinetica dei gas 626
- 22 Macchine termiche, entropia e secondo principio della termodinamica 653

Indice generale

Autori VII
Prefazione X
Per gli studenti XXIII

P A R T E 1 Meccanica 1

1 Fisica e misura 2

- 1.1 Campioni di lunghezza, massa e tempo 3
- 1.2 Sviluppo di modelli e la materia 6
- 1.3 Analisi dimensionale 7
- 1.4 Conversione delle unità di misura 9
- 1.5 Stime e calcoli di ordine di grandezza 10
- 1.6 Cifre significative 11

2 Moto in una dimensione 21

- 2.1 Posizione, velocità e velocità scalare 22
- 2.2 Velocità istantanea e velocità scalare istantanea 25
- 2.3 Modello di analisi: un punto materiale con velocità costante 28
- 2.4 Accelerazione 31
- 2.5 Diagrammi di moto 35
- 2.6 Modello di analisi: un punto materiale con accelerazione costante 36
- 2.7 Corpi in caduta libera 40
- 2.8 Il calcolo differenziale applicato alla cinematica 43

3 Vettori 59

- 3.1 Sistemi di coordinate 59
- 3.2 Grandezze vettoriali e grandezze scalari 61
- 3.3 Alcune proprietà dei vettori 62
- 3.4 Componenti di un vettore e vettori unitari 65

4 Moto in due dimensioni 78

- 4.1 Vettori spostamento, velocità ed accelerazione 78
- 4.2 Moto in due dimensioni con accelerazione costante 81
- 4.3 Moto dei proiettili 84
- 4.4 Modello di analisi: punto materiale in moto circolare uniforme 91
- 4.5 Accelerazione tangenziale e radiale 94
- 4.6 Velocità ed accelerazione relative 96

5 Le leggi del moto 111

- 5.1 Il concetto di forza 111
- 5.2 La prima legge di Newton ed i sistemi inerziali 113
- 5.3 La massa 114
- 5.4 La seconda legge di Newton 115
- 5.5 La forza gravitazionale ed il peso 117

- 5.6 La terza legge di Newton 118
- 5.7 Modelli di analisi che usano la seconda legge di Newton 120
- 5.8 Forze di attrito 130

6 Il moto circolare ed altre applicazioni delle leggi di Newton 150

- 6.1 Estensione del modello punto materiale in moto circolare uniforme 150
- 6.2 Moto circolare non uniforme 156
- 6.3 Moto in sistemi di riferimento accelerati 158
- 6.4 Moto in presenza di forze frenanti 161

7 Energia di un sistema 177

- 7.1 Sistemi e ambiente esterno 178
- 7.2 Lavoro compiuto da una forza costante 178
- 7.3 Prodotto scalare tra due vettori 181
- 7.4 Lavoro compiuto da una forza variabile 183
- 7.5 Energia cinetica e teorema dell'energia cinetica 188
- 7.6 Energia potenziale di un sistema 191
- 7.7 Forze conservative e non conservative 196
- 7.8 Relazione tra forze conservative ed energia potenziale 198
- 7.9 Diagrammi energetici ed equilibrio di un sistema 199

8 Conservazione dell'energia 211

- 8.1 Modello di analisi: sistema non isolato (energia) 212
- 8.2 Modello di analisi: sistema isolato (energia) 215
- 8.3 Sistemi con attrito dinamico 222
- 8.4 Forze non conservative e variazioni di energia meccanica 227
- 8.5 Potenza 232

9 Quantità di moto e urti 247

- 9.1 Quantità di moto 247
- 9.2 Modello di analisi: sistema isolato (quantità di moto) 250
- 9.3 Modello di analisi: sistema non isolato (quantità di moto) 252
- 9.4 Urti in una dimensione 256
- 9.5 Urti in due dimensioni 264
- 9.6 Il centro di massa 267
- 9.7 Sistemi di punti materiali 272
- 9.8 Sistemi deformabili 275
- 9.9 Propulsione di un razzo 277

10 Rotazione di un corpo rigido attorno ad un asse fisso 293

- 10.1 Posizione angolare, velocità angolare e accelerazione angolare 293
- 10.2 Modello di analisi: corpo rigido con accelerazione angolare costante 296
- 10.3 Variabili angolari e variabili lineari 298
- 10.4 Momento di una forza 300
- 10.5 Modello di analisi: corpo rigido soggetto ad un momento risultante 302

- 10.6 Calcolo di momenti di inerzia 307
- 10.7 Energia cinetica di rotazione 311
- 10.8 Considerazioni energetiche nel moto rotatorio 312
- 10.9 Rotolamento di un corpo rigido 316
- 11 Il momento angolare 335**
- 11.1 Prodotto vettoriale e momento di una forza 335
- 11.2 Modello di analisi: sistema non isolato (momento angolare) 338
- 11.3 Momento angolare di un corpo rigido in rotazione 342
- 11.4 Modello di analisi: sistema isolato (momento angolare) 345
- 11.5 Moto di giroscopi e trottolo 350

12 Equilibrio statico ed elasticità 363

- 12.1 Modello di analisi: corpo rigido in equilibrio 363
- 12.2 Ancora sul baricentro 365
- 12.3 Esempi di corpi rigidi in equilibrio statico 366
- 12.4 Proprietà elastiche dei solidi 373

13 Gravitazione universale 388

- 13.1 Legge di gravitazione universale di Newton 389
- 13.2 Accelerazione di caduta libera e forza gravitazionale 391
- 13.3 Modello di analisi: punto materiale in un campo (campo gravitazionale) 392
- 13.4 Le leggi di Keplero ed il moto dei pianeti 394
- 13.5 Energia potenziale gravitazionale 400
- 13.6 Considerazioni energetiche nel moto dei pianeti e dei satelliti 402

14 La meccanica dei fluidi 417

- 14.1 Pressione 417
- 14.2 Variazione della pressione con la profondità 419
- 14.3 Misure di pressione 423
- 14.4 Spinta di Archimede e principio di Archimede 423
- 14.5 Dinamica dei fluidi 427
- 14.6 L'Equazione di Bernoulli 430
- 14.7 Alcune applicazioni di fluidodinamica 433

P A R T E 2

Oscillazioni e onde meccaniche 449

15 Moto oscillatorio 450

- 15.1 Moto di un corpo attaccato ad una molla 450
- 15.2 Modello di analisi: punto materiale in moto armonico 452
- 15.3 Energia di un oscillatore armonico 458
- 15.4 Confronto fra il moto armonico e il moto circolare uniforme 462
- 15.5 Il pendolo 464
- 15.6 Oscillazioni smorzate 468
- 15.7 Oscillazioni forzate 469

16 Moto delle onde 483

- 16.1 Propagazione di una perturbazione 484
- 16.2 Modelli di analisi: onda progressiva 487
- 16.3 La velocità delle onde sulle corde 491
- 16.4 Riflessione e trasmissione 494

- 16.5 La velocità di trasferimento di energia attraverso le onde sinusoidali sulle corde 495
- 16.6 L'equazione lineare delle onde 497

17 Onde sonore 507

- 17.1 Variazioni di pressione nelle onde sonore 508
- 17.2 Velocità delle onde sonore 510
- 17.3 Intensità delle onde sonore periodiche 512
- 17.4 L'effetto Doppler 517

18 Sovrapposizione e onde stazionarie 533

- 18.1 Modello di analisi: onde ed interferenza 534
- 18.2 Onde stazionarie 538
- 18.3 Modello di analisi: onde con condizioni al contorno 541
- 18.4 Risonanza 546
- 18.5 Onde stazionarie in colonne d'aria 546
- 18.6 Onde stazionarie in sbarre e membrane 550
- 18.7 Battimenti: interferenza temporale 550
- 18.8 Forme d'onda non sinusoidali 553

P A R T E 3

Termodinamica 567

19 Temperatura 568

- 19.1 Temperatura e principio zero della termodinamica 568
- 19.2 I termometri e la scala Celsius delle temperature 570
- 19.3 Il termometro a gas a volume costante e la scala assoluta delle temperature 571
- 19.4 Dilatazione termica di solidi e liquidi 573
- 19.5 Descrizione macroscopica di un gas perfetto 578

20 Il primo principio della termodinamica 590

- 20.1 Calore ed energia interna 590
- 20.2 Calore specifico e calorimetria 593
- 20.3 Calore latente 597
- 20.4 Lavoro e calore nelle trasformazioni termodinamiche 601
- 20.5 Il primo principio della termodinamica 603
- 20.6 Alcune applicazioni del primo principio della termodinamica 604
- 20.7 Meccanismi di scambio di energia nei processi termici 608

21 La teoria cinetica dei gas 626

- 21.1 Modello molecolare di un gas perfetto 627
- 21.2 Calore specifico molare di un gas perfetto 631
- 21.3 Equipartizione dell'energia 635
- 21.4 Trasformazioni adiabatiche di un gas perfetto 637
- 21.5 Distribuzione delle velocità molecolari 639

22 Macchine termiche, entropia e secondo principio della termodinamica 653

- 22.1 Le macchine termiche e il secondo principio della termodinamica 654
- 22.2 Pompe di calore e frigoriferi 656
- 22.3 Trasformazioni reversibili e irreversibili 659
- 22.4 La macchina di Carnot 660
- 22.5 Motori a benzina e motori diesel 665
- 22.6 Entropia 667

- 22.7 Variazioni di entropia nei sistemi termodinamici 671
- 22.8 Entropia e secondo principio 676

Appendici

A Tabella A-1

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

B Richiami di analisi matematica A-4

- B.1 Notazione scientifica A-4
- B.2 Algebra A-5
- B.3 Geometria A-10
- B.4 Trigonometria A-11

- B.5 Sviluppo in serie A-13
- B.6 Calcolo differenziale A-13
- B.7 Calcolo integrale A-16
- B.8 Propagazione degli errori A-20

C Tavola periodica degli elementi A-22

D Unità SI A-24

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

Risposte ai quiz e ai problemi con
numero dispari A-25

Indice analitico I-1

Autori



Raymond A. Serway ha ricevuto il suo dottorato all'Illinois Institute of Technology ed è attualmente Professore Emerito alla James Madison University. Nel 2011 è stato insignito di un titolo di dottorato onorario dalla sua *alma mater*, lo Utica College. Nel 1990 la James Madison University, dove avrebbe insegnato per 17 anni, gli aveva conferito il Madison Scholar Award. Cominciò la sua carriera di insegnante alla Clarkson University, dove condusse attività di ricerca ed insegnò dal 1967 al 1980. Nel 1977 ricevette il Distinguished Teaching Award dalla Clarkson University e lo Alumni Achievement Award dall'Utica College nel 1985. È stato Guest Scientist allo IBM Research Laboratory a Zurigo, in Svizzera, dove ha lavorato con K. Alex Müller, premio Nobel nel 1987. Il Dr. Serway è stato anche scienziato ospite all'Argonne National Laboratory, dove ha collaborato con il suo maestro ed amico Sam Marshall. È coautore, oltre che delle precedenti edizioni di questo testo, di *College Physics*, nona edizione, *Principles of Physics*, quinta edizione, *Essentials of College Physics*, *Modern Physics*,

terza edizione, e del testo *Physics* per le scuole superiori, pubblicato da Holt McDougal. Il Dr. Serway ha pubblicato più di 40 articoli scientifici nel campo della fisica dei mezzi condensati ed ha svolto più di 60 presentazioni a convegni scientifici. Il Dr. Serway e sua moglie Elizabeth amano viaggiare, giocare a golf e trascorrere il loro tempo libero con i loro quattro figli e dieci nipoti.



John W. Jewett, Jr. ha conseguito la laurea in Fisica alla Drexel University e il dottorato all'Ohio State University, specializzandosi in ottica e proprietà magnetiche della materia condensata. Ha iniziato la sua carriera accademica presso il Richard Stockton College nel New Jersey, dove ha insegnato dal 1974 al 1984. È attualmente Professore di Fisica alla California State Polytechnic University, Pomona. Attraverso tutta la sua carriera di insegnante, il Dr. Jewett si è particolarmente impegnato a dare impulso all'istruzione scientifica. Oltre a ricevere quattro finanziamenti dalla National Science Foundation, ha contribuito a fondare e dirigere il Southern California Area Modern Physics Institute (SCAMPI) e il Science IMPACT (Institute for Modern Pedagogy and Creative Teaching). Fra i riconoscimenti ricevuti dal Dr. Jewett vanno citati lo Stockton Merit Award del Richard Stockton College del 1980, l'Outstanding Professor Award della California State Polytechnic University per il 1991-1992 e, nel 1998,

l'Excellence in Undergraduate Physics Teaching Award dalla American Association of Physics Teachers (AAPT). Nel 2010 è stato insignito dell'Alumni Lifetime Achievement Award dalla Drexel University in riconoscimento del suo contributo all'insegnamento della fisica. Ha tenuto più di 100 presentazioni in conferenze scientifiche nazionali ed internazionali dell'AAPT. Ha pubblicato 25 articoli di ricerca in fisica della materia condensata e ricerca sull'insegnamento della fisica. È autore di *The World of Physics: Mysteries, Magic, and Myth*, che fornisce numerose correlazioni tra la fisica e le esperienze quotidiane. Oltre ad essere coautore di questo libro di testo, è anche coautore di *Principles of Physics*, quinta edizione, e di *Global Issues*, un'opera in quattro volumi di manuali di istruzioni per la scienza integrata per le scuole superiori. Il Dr. Jewett si diletta a suonare la tastiera nella sua band di soli fisici, a viaggiare, a fare foto subacquee, a imparare le lingue e a collezionare oggetti antichi che possano servire per dimostrazioni di fisica nelle lezioni. Trascorre il suo tempo libero con la moglie Lisa, i figli ed i nipotini.

Curatori

Traduzione a cura di:

Carlo Angelini – Università degli Studi di Pisa

Sergio Betti – Accademia Navale di Livorno

Luigi Diana – Università degli Studi di Pisa

Mauro Morganti – Accademia Navale di Livorno

Andrea Verlicchi – Accademia Navale di Livorno

Revisione a cura di:

Carlo Angelini – Università degli Studi di Pisa

Mauro Morganti – Accademia Navale di Livorno

Prefazione

Nella stesura di questa edizione di *Fisica per Scienze ed Ingegneria* abbiamo proseguito nello sforzo di rendere sempre più chiara l'esposizione degli argomenti e di introdurre nuovi strumenti pedagogici, nel tentativo di migliorare ancora i processi di apprendimento e di insegnamento. Per raffinare ulteriormente il testo ed andare sempre più incontro alle necessità degli studenti e degli insegnanti abbiamo fatto tesoro delle reazioni di chi ha utilizzato la precedente edizione e dei suggerimenti dei revisori. Questo libro è pensato come libro di testo per un corso iniziale di base per studenti di scienze o di ingegneria. Il contenuto completo del libro nella sua versione estesa può essere coperto in un corso di tre semestri. È però anche possibile utilizzare solo una parte del materiale, semplicemente omettendo alcuni capitoli o paragrafi scelti opportunamente. Lo studente che inizi a seguire questo corso si troverebbe in una situazione ideale se fosse già in possesso di quelle conoscenze matematiche che normalmente si acquisiscono in un corso semestrale di calcolo differenziale. Se questo non fosse possibile, lo studente dovrebbe seguire il corso di matematica in parallelo al corso di fisica.

Contenuti

Il materiale di questo libro copre gli argomenti di base della fisica classica e fornisce una introduzione alla fisica moderna. Il libro è diviso in sei parti. La Parte 1 (Capitoli da 1 a 14) espone i fondamenti della meccanica newtoniana e della fisica dei fluidi; la Parte 2 (Capitoli da 15 a 18) riguarda le oscillazioni, le onde meccaniche ed il suono; la Parte 3 (Capitoli da 19 a 22) è dedicata al calore ed alla termodinamica; la Parte 4 (Capitoli da 23 a 34) tratta dell'elettricità e del magnetismo; la Parte 5 (Capitoli da 35 a 38) si occupa della luce e dell'ottica; la Parte 6 (Capitolo 39) affronta la relatività e la fisica moderna.

Obiettivi

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

Novità di questa edizione

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

Migliore integrazione dell'approccio con modelli di analisi alla soluzione dei problemi. Gli studenti affrontano centinaia di problemi durante il corso di fisica, le cui basi sono costituite da un piccolo numero di principi fondamentali. Quando si trova ad affrontare un nuovo problema, il fisico crea un modello del problema che possa essere risolto in modo semplice identificando il principio fondamentale applicabile ad esso. Ad esempio, molti problemi riguardano la conservazione dell'energia, la seconda legge di Newton o le equazioni cinematiche. Poiché il fisico ha studiato estesamente questi principi e le loro applicazioni, egli applica tali conoscenze come modello per la soluzione di un nuovo problema. Benché sarebbe l'ideale per gli studenti seguire questa stessa procedura, la maggior parte di essi ha difficoltà ad acquisire dimestichezza con l'intero spettro di principi fondamentali disponibili. Per gli studenti è più semplice identificare una *situazione* piuttosto che un principio fondamentale.

L'*approccio con modelli di analisi* su cui focalizziamo l'attenzione si basa su un insieme standard di situazioni che compaiono nella maggior parte dei problemi di fisica. Tali situazioni sono riferite a un'entità appartenente a uno di quattro modelli semplificati: punto materiale, sistema, corpo rigido e onda. Una volta identificato il modello semplificato, lo studente pensa a cosa l'entità sta facendo o a come interagisce con il suo ambiente. Questo lo conduce a identificare un determinato Modello di Analisi per il problema. Ad esempio, se un oggetto sta cadendo, esso è riconosciuto come un punto materiale sottoposto a un'accelerazione dovuta alla gravità, che è costante. Lo studente ha appreso che il modello di analisi *punto materiale sottoposto ad accelerazione costante* descrive questa situazione. Inoltre, questo modello ha un piccolo numero di equazioni associate da usare per dare inizio alla soluzione del problema, le equazioni cinematiche presentate nel Capitolo 2. Pertanto, la comprensione della situazione ha condotto a un modello di analisi, che ha poi indicato un piccolissimo numero di equazioni per dare inizio alla soluzione del problema piuttosto che ricorrere alla miriade di equazioni che gli studenti vedono nel testo. In questo modo, l'uso dei modelli di analisi porta lo studente a identificare il principio fondamentale. Con l'acquisizione di un'esperienza sempre maggiore, lo studente farà sempre meno ricorso all'uso dei modelli di analisi e comincerà a identificare direttamente i principi fondamentali.

Per meglio integrare l'approccio con modelli di analisi in questa edizione, al termine di ogni paragrafo che introduce un nuovo modello di analisi è stato inserito un box descrittivo "Modello di analisi". Questo elemento ricapitola il modello di analisi introdotto nel paragrafo e fornisce esempi dei tipi di problemi che lo studente potrebbe risolvere adoperando tale modello di analisi. Questi box fungono da "rinfrescata" prima che lo studente veda i modelli di analisi in uso negli esempi svolti relativi a un dato paragrafo.

Le risoluzioni degli esempi svolti nel testo integrano l'approccio con modelli di analisi alla soluzione dei problemi. L'approccio è ulteriormente rafforzato nel sommario di fine capitolo con il titolo *Modelli di analisi per la soluzione dei problemi*.

Tutorial con modelli di analisi. John Jewett ha sviluppato 165 tutorial che rafforzano le abilità di soluzione dei problemi degli studenti guidandoli passo passo nel processo di risoluzione dei problemi. Importanti passaggi iniziali comprendono la formulazione di previsioni e la focalizzazione su concetti fisici prima di risolvere il problema quantitativamente. Una componente critica di questi tutorial è la scelta di un adeguato modello di analisi per descrivere cosa sta accadendo nel problema. Questo passaggio consente agli studenti di fare l'importante associazione tra la situazione presentata nel problema e la sua rappresentazione matematica. I tutorial con modelli di analisi includono un feedback significativo ad ogni passaggio per aiutare gli studenti a fare pratica nella procedura di risoluzione dei problemi e a migliorare le proprie abilità. Inoltre, il feedback affronta le convinzioni errate degli studenti e li aiuta a scovare gli errori algebrici e altri errori matematici. La risoluzione è descritta simbolicamente il più a lungo possibile, sostituendo i valori numerici solo alla fine. Questa caratteristica aiuta gli studenti a comprendere gli effetti delle variazioni dei valori di ciascuna variabile nel problema, evita la sostituzione ripetitiva non necessaria degli stessi numeri ed elimina gli errori di arrotondamento. Il feedback al termine del tutorial incoraggia gli studenti a confrontare la risposta finale con le loro previsioni originarie.

che il corpo cada. Se facciamo così, sappiamo che quando il corpo raggiunge una posizione 2.0 cm al di sotto del punto di partenza, possiede una *velocità*, coerentemente con l'Equazione 7.17.

Sul corpo viene compiuto un lavoro complessivo positivo e di conseguenza acquista una energia cinetica dopo aver percorso il tratto di 2.0 cm. L'unico modo di evitare che il corpo acquisti energia cinetica è quello di abbassarlo molto lentamente con la nostra mano. Ma in tal caso sul corpo agisce una terza forza che compie lavoro sul corpo, la forza normale della nostra mano. Se calcoliamo questo lavoro e lo sommiamo a quello compiuto dalla molla e dalla forza gravitazionale, il lavoro complessivo compiuto sul corpo è nullo, coerentemente con il fatto che nella posizione 2.0 cm (finale) la sua velocità è nulla.

Prima abbiamo osservato che il lavoro può essere considerato come un meccanismo per trasferire energia in un sistema. L'Equazione 7.17 traduce matematicamente questo concetto. Quando il lavoro W_{est} è compiuto su un sistema, si ha un trasferimento di energia attraverso il contorno del sistema. Il risultato, nel caso dell'Equazione 7.17, consiste in una variazione ΔK dell'energia cinetica del sistema. Nel prossimo paragrafo studieremo un altro tipo di energia che può essere immagazzinata in un sistema quando si compie lavoro su di esso.

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

Esempio 7.6

Un blocco spinto su una superficie liscia

Un blocco di massa 6.0 kg inizialmente in quiete viene spinto verso destra su un piano orizzontale privo di attrito da una forza costante, diretta orizzontalmente, di intensità 12 N. Si determini la velocità dopo che si è spostato di 3.0 m.

SOLUZIONE

Concettualizzare La Figura 7.13 illustra la situazione. Immaginiamo di spingere su un tavolo un'automobilina tirandola con un elastico diretto orizzontalmente. Mantenendo invariata la lunghezza dell'elastico garantiamo che la forza applicata sia costante.

Classificare Potremmo applicare le equazioni della cinematica per ricavare la risposta, ma facciamo pratica con l'approccio energetico. Il blocco è il sistema sul quale agiscono tre forze esterne. Sul corpo, la forza normale bilancia la forza gravitazionale, ma nessuna di queste forze agenti verticalmente compie lavoro sul corpo, poiché il loro punto di applicazione si sposta orizzontalmente.

Analizzare La forza risultante esterna agente sul blocco è una forza diretta orizzontalmente di 12 N.

Si usa il teorema dell'energia cinetica per il blocco osservando che l'energia cinetica iniziale è nulla:

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

Si risolve in v_f e si usa l'Equazione 7.1 per il calcolo del lavoro compiuto sul blocco dalla forza:

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

Si sostituisce il valore numerico ottenendo:

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

Concludere Si potrebbe risolvere nuovamente questo problema schematizzando il blocco come un *punto materiale soggetto ad una forza risultante* e calcolando la sua accelerazione; quindi considerando il punto materiale con accelerazione costante ricavare la sua velocità finale. Nel Capitolo 8, si vedrà che la procedura sull'energia utilizzata per la soluzione di questo esercizio è un esempio del modello di analisi *sistema non isolato*.

E SE?

Supponiamo che l'intensità della forza in questo esempio venga raddoppiata e sia quindi $F' = 2F$. Il blocco di 6.0 kg a causa della nuova forza applicata accelera fino alla velocità di 3.5 m/s percorrendo uno spostamento $\Delta x'$. Come si confronta lo spostamento $\Delta x'$ con lo spostamento Δx calcolato precedentemente?

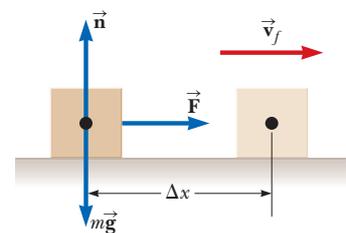


Figura 7.13 (Esempio 7.6) Un blocco spinto verso destra su una superficie priva di attrito da una forza costante diretta orizzontalmente.

7.6 continua

Risposta Se spingiamo più intensamente, il blocco dovrebbe raggiungere una data velocità percorrendo uno spazio minore, e quindi ci aspettiamo che $\Delta x' < \Delta x$. In entrambi i casi il blocco subisce la stessa variazione di energia cinetica ΔK . Matematicamente, dal teorema dell'energia cinetica, si ricava che

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

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

e la distanza è minore, come ci aspettavamo.

Esempio concettuale 7.7

L'utilizzo di una rampa di carico riduce il lavoro?

Un uomo vuole caricare un frigorifero su un furgone con l'aiuto di una rampa di carico inclinata di un angolo θ come illustrato in Figura 7.14. Egli è convinto che il lavoro necessario per caricare il frigorifero diminuisca se viene aumentata la lunghezza L della rampa. È vero o no?

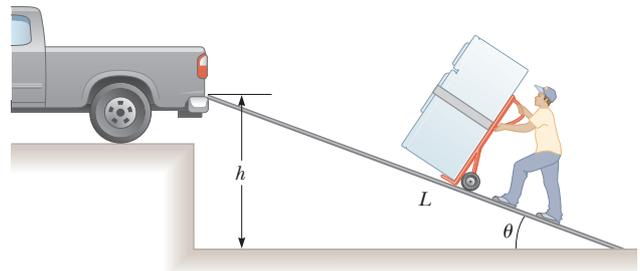


Figura 7.14 (Esempio concettuale 7.7) Un frigorifero è spinto su una rampa a velocità costante, con l'aiuto di un carrello privo di attrito.

SOLUZIONE

No. Supponiamo che il frigorifero, montato su un carrello, sia spinto su per la rampa a velocità costante. In questo caso, per il sistema costituito dal frigorifero e dal carrello, $\Delta K = 0$. La forza normale esercitata sul sistema dalla rampa è diretta a 90° rispetto allo spostamento del suo punto di applicazione e pertanto non compie lavoro sul sistema. Poiché $\Delta K = 0$, dal teorema dell'energia cinetica si ha

$$W_{\text{est}} = W_{\text{uomo}} + W_{\text{gravità}} = 0$$

Il lavoro compiuto dalla forza di gravità è uguale al prodotto tra il peso del sistema mg , lo spostamento L del frigorifero e $\cos(\theta + 90^\circ)$. Pertanto,

$$W_{\text{uomo}} = -W_{\text{gravità}} = -(mg)(L)[\cos(\theta + 90^\circ)]$$

$$= mgL \sin \theta = mgh$$

dove $h = L \sin \theta$ è l'altezza della rampa. L'uomo quindi deve compiere la stessa quantità di lavoro mgh sul sistema *indipendentemente* dalla lunghezza della rampa. Il lavoro dipende solo dall'altezza della rampa. Anche se la forza richiesta è minore per una rampa più lunga, il punto di applicazione di tale forza subisce uno spostamento più lungo.

7.6 Energia potenziale di un sistema

Finora in questo capitolo, abbiamo definito un sistema in generale ma abbiamo concentrato la nostra attenzione principalmente su singoli punti materiali o corpi sotto l'influenza di forze esterne. Consideriamo ora sistemi costituiti da due o più punti materiali o corpi interagenti mediante una forza *interna* al sistema. L'energia cinetica di tali sistemi è la somma algebrica delle energie cinetiche di tutti i costituenti. Vi sono tuttavia dei sistemi in cui uno dei corpi ha una massa talmente grande che può essere considerato stazionario e la sua energia cinetica può essere trascurata. Per esempio, se consideriamo il sistema costituito da una palla e dalla Terra e lasciamo cadere la palla, l'energia cinetica del sistema è essenzialmente la sola energia cinetica della palla. La Terra si muove così lentamente in tale processo che la sua energia cinetica può essere trascurata. Viceversa, l'energia cinetica di un sistema costituito da due elettroni deve includere l'energia cinetica di entrambe le particelle.

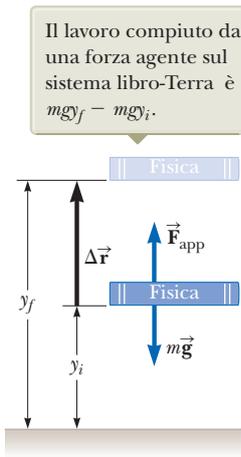


Figura 7.15 Un agente esterno solleva il libro lentamente da un'altezza y_i ad un'altezza y_f .

Prevenire l'errore 7.7

Energia potenziale L'espressione *energia potenziale* non si riferisce a qualcosa che potenzialmente può diventare energia. L'energia potenziale è energia.

Prevenire l'errore 7.8

L'energia potenziale si riferisce ad un sistema. L'energia potenziale è sempre associata ad un *sistema* di due o più corpi interagenti tra loro. Quando un piccolo corpo si muove in prossimità della superficie terrestre sotto l'influenza della gravità, possiamo a volte parlare di energia potenziale "associata al corpo" piuttosto che "associata al sistema", come sarebbe più corretto; questo è giustificato dal fatto che la Terra non subisce uno spostamento apprezzabile. Tuttavia noi non parleremo di energia potenziale "del corpo" poiché questo modo di dire non tiene conto del ruolo della Terra.

Energia potenziale gravitazionale ▶

Pensiamo a un sistema costituito da un libro e dalla Terra, interagenti attraverso la forza gravitazionale. Compriamo un certo lavoro sul sistema sollevando lentamente il libro che compie uno spostamento verticale $\Delta\vec{r} = (y_f - y_i)\hat{j}$ come mostrato nella Figura 7.15. In accordo con la nostra discussione sul lavoro inteso come trasferimento di energia, il lavoro compiuto sul sistema deve manifestarsi come un aumento di energia del sistema. Il libro è in quiete prima che compiamo il lavoro ed è in quiete dopo che lo abbiamo compiuto. Quindi, non c'è variazione dell'energia cinetica del sistema.

Poiché la variazione di energia del sistema non compare nella forma di energia cinetica, deve essere immagazzinata come qualche altra forma di energia. Dopo aver sollevato il libro, potremmo lasciarlo andare e farlo cadere fino alla posizione iniziale y_i . Si noti che ora il libro (e quindi il sistema) possiede energia cinetica e la causa di tale energia deriva dal fatto che si è compiuto lavoro nel sollevare il libro. Possiamo dire che quando il libro si trova nella posizione più alta, l'energia del sistema ha la *potenzialità* di diventare energia cinetica, che non si manifesta finché non lasciamo cadere il libro. Pertanto, il meccanismo di immagazzinamento di energia prima che il libro venga lasciato cadere è chiamato **energia potenziale**. Scopriremo che l'energia potenziale di un sistema può essere associata solo a particolari tipi di forze agenti tra i costituenti. La quantità di energia potenziale del sistema è determinata dalla *configurazione* del sistema. Spostando i membri del sistema in posizioni differenti o ruotandoli, possiamo variare la configurazione del sistema e quindi la sua energia potenziale.

Deriviamo ora una espressione per l'energia potenziale associata ad un oggetto che si trova in una data posizione al di sopra della superficie terrestre. Consideriamo un agente esterno che solleva un corpo di massa m da un'altezza iniziale y_i ad un'altezza finale y_f come nella Figura 7.15. Assumiamo che il sollevamento avvenga lentamente, senza accelerazione, di modo che la forza applicata dall'agente esterno sia uguale in modulo alla forza gravitazionale agente sul corpo: il corpo è schematizzato come un punto materiale in equilibrio in moto con velocità costante. Il lavoro compiuto dall'agente esterno sul sistema (corpo e Terra) quando il corpo viene spostato verso l'alto è dato dal prodotto della forza applicata verso l'alto \vec{F}_{app} per lo spostamento verso l'alto di tale forza, $\Delta\vec{r} = \Delta y\hat{j}$:

$$W_{est} = (\vec{F}_{app}) \cdot \Delta\vec{r} = (mg\hat{j}) \cdot [(y_f - y_i)\hat{j}] = mgy_f - mgy_i \quad (7.18)$$

Tale risultato rappresenta il lavoro complessivo compiuto sul sistema dato che la forza applicata è la sola forza sul sistema da parte dell'ambiente. (Ricordate che la forza gravitazionale è una forza *interna* al sistema.) Si noti la somiglianza tra l'Equazione 7.18 e l'Equazione 7.15. In ciascuna delle equazioni il lavoro compiuto sul sistema è uguale alla differenza tra i valori finale e iniziale di una certa grandezza. Nell'Equazione 7.15 il lavoro rappresenta un trasferimento di energia nel sistema e l'incremento dell'energia del sistema si manifesta sotto forma di energia cinetica. Nell'Equazione 7.18 il lavoro rappresenta un trasferimento di energia nel sistema e l'energia del sistema si manifesta in una forma diversa, che abbiamo chiamato energia potenziale.

Pertanto possiamo identificare la quantità mgy come l'**energia potenziale gravitazionale** U_g di un sistema di un corpo di massa m e della Terra:

$$U_g \equiv mgy \quad (7.19)$$

L'energia potenziale gravitazionale si misura in joule, cioè nelle stesse unità del lavoro e dell'energia cinetica. L'energia potenziale, come il lavoro e l'energia cinetica, è una quantità scalare. Si noti che l'Equazione 7.19 è valida solo per corpi in prossimità della superficie terrestre, dove g è approssimativamente costante.³

Usando la nostra definizione di energia potenziale gravitazionale, l'Equazione 7.18 può essere riscritta nella forma:

$$W_{est} = \Delta U_g \quad (7.20)$$

che matematicamente dice che il lavoro esterno compiuto sul sistema in questa situazione si manifesta come variazione dell'energia potenziale gravitazionale del sistema.

L'Equazione 7.20 è simile nella forma all'Equazione 7.17 teorema dell'energia cinetica (o teorema delle forze vive). Nell'Equazione 7.17, il lavoro è compiuto sul si-

³L'assunzione che g sia costante è valida finché gli spostamenti verticali del corpo sono piccoli rispetto al raggio della Terra.

stema e l'energia appare nel sistema come energia cinetica, rappresentando il moto dei membri del sistema. Nell'Equazione 7.20, il lavoro è compiuto sul sistema e l'energia appare nel sistema come energia potenziale, rappresentando una variazione nella configurazione dei membri del sistema.

L'energia potenziale gravitazionale dipende unicamente dall'altezza del corpo rispetto alla superficie della Terra. Si compie la stessa quantità di lavoro sul sistema corpo-Terra, sia che il corpo venga lasciato cadere verticalmente da una data altezza sia che scivoli lungo un piano inclinato privo di attrito partendo dalla stessa altezza, purché la quota finale sia la stessa. Abbiamo verificato questa affermazione nel caso particolare di un frigorifero spinto lungo una rampa nell'Esempio concettuale 7.7. Possiamo dimostrare questa affermazione in generale calcolando il lavoro compiuto su un corpo da un agente che sposta il corpo lungo un percorso arbitrario, con spostamenti sia verticali che orizzontali:

$$W_{\text{est}} = (\vec{F}_{\text{app}}) \cdot \Delta \vec{r} = (mg\hat{j}) \cdot [(x_f - x_i)\hat{i} + (y_f - y_i)\hat{j}] = mgy_f - mgy_i$$

dove non compare nel risultato finale nessun termine che contiene x dato che $\hat{j} \cdot \hat{i} = 0$.

Nel risolvere i problemi, dobbiamo scegliere una configurazione geometrica di riferimento in cui l'energia potenziale gravitazionale di un sistema viene posta uguale ad un determinato valore, che normalmente è zero. La scelta della configurazione di riferimento è del tutto arbitraria dato che la quantità importante è la differenza di energia potenziale, e tale differenza non dipende dalla scelta della configurazione di riferimento.

Spesso conviene scegliere come configurazione di riferimento per lo zero dell'energia potenziale gravitazionale la configurazione in cui un corpo si trova sulla superficie terrestre, ma questa scelta non è essenziale. Spesso il contesto del problema suggerisce l'uso di una conveniente configurazione.

Quiz 7.6 Si scelga la risposta corretta. L'energia potenziale gravitazionale di un sistema (a) è sempre positiva (b) è sempre negativa (c) può essere positiva o negativa.

Esempio 7.8

L'atleta orgoglioso e l'alluce dolente

Un trofeo, mentre viene mostrato, scivola dalle mani di un atleta disattento cadendogli sul piede. Scegliendo un sistema di coordinate con $y = 0$ al livello del suolo, si calcoli la variazione di energia potenziale del sistema trofeo-Terra durante la caduta del trofeo. Si ripeta il calcolo usando come origine delle coordinate la sommità della testa del giocatore.

SOLUZIONE

Concettualizzare Il trofeo varia la sua quota rispetto alla superficie della Terra. A causa di questa variazione vi è una variazione dell'energia potenziale gravitazionale del sistema trofeo-Terra.

Classificare Dobbiamo valutare una variazione di energia potenziale gravitazionale definita in questo paragrafo; classifichiamo quindi questo esempio come un problema di sostituzione. Poiché non vengono forniti dati nel testo del problema, è anche un problema di stima.

Il problema indica che la configurazione di riferimento corrispondente allo zero dell'energia potenziale del sistema trofeo-Terra è quella in cui il trofeo si trova sul pavimento. Per ricavare la variazione di energia potenziale del sistema dobbiamo dare una stima di alcune grandezze. Possiamo ipotizzare che il trofeo abbia una massa di circa 2 kg, e il piede di una persona si trovi a circa 0.05 m dal pavimento. Inoltre, assumeremo che il trofeo cada da un'altezza di 1.4 m.

Si calcola l'energia potenziale gravitazionale del sistema trofeo-Terra prima che il trofeo cada:

$$U_i = mgy_i = (2 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2)(1.4 \text{ m}) = 27.4 \text{ J}$$

Si calcola l'energia potenziale gravitazionale del sistema trofeo-Terra quando il trofeo raggiunge il piede dell'atleta:

$$U_f = mgy_f = (2 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2)(0.05 \text{ m}) = 0.98 \text{ J}$$

Si ricava la variazione di energia potenziale gravitazionale del sistema trofeo-Terra:

$$\Delta U_g = 0.98 \text{ J} - 27.4 \text{ J} = -26.4 \text{ J}$$

continua

7.8 continua

Probabilmente dovremmo arrotondare il risultato data la grossolanità delle nostre stime; possiamo valutare che la variazione di energia potenziale gravitazionale sia -26 J . Il sistema possedeva 27 J di energia potenziale gravitazionale prima che il trofeo cadesse ed approssimativamente un'energia potenziale di 1 J quando il trofeo raggiunge la parte superiore del piede.

Nel secondo caso indicato dal problema la configurazione di riferimento per lo zero dell'energia potenziale corrisponde alla situazione in cui il trofeo si trova al livello della testa del giocatore (anche se il trofeo non occupa mai tale posizione durante il suo moto). Stimiamo che la testa del giocatore si trovi a 2.0 m al di sopra del pavimento.

Si calcola l'energia potenziale gravitazionale del sistema trofeo-Terra prima che il trofeo cada dalla sua posizione iniziale, 0.6 m al di sotto della testa dell'atleta:

$$U_i = mgy_i = (2 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2)(-0.6 \text{ m}) = -11.8 \text{ J}$$

Si calcola l'energia potenziale gravitazionale del sistema trofeo-Terra quando il trofeo raggiunge il piede dell'atleta, posto a 1.95 m al di sotto della sua posizione iniziale:

$$U_f = mgy_f = (2 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2)(-1.95 \text{ m}) = -38.2 \text{ J}$$

Si ricava la variazione di energia potenziale gravitazionale del sistema trofeo-Terra:

$$\Delta U_g = -38.2 \text{ J} - (-11.8 \text{ J}) = -26.4 \text{ J} \approx -26 \text{ J}$$

Questo valore è lo stesso di quello calcolato prima, come deve essere. La variazione di energia potenziale è indipendente dalla scelta della quota di riferimento che rappresenta lo zero dell'energia potenziale. Se noi vogliamo mantenere nei nostri valori stimati solo una cifra significativa, possiamo scrivere il risultato finale come $3 \times 10^1 \text{ J}$.

Energia potenziale elastica

Poiché le componenti di un sistema possono interagire tra loro attraverso differenti tipi di forze, è possibile che, nello stesso sistema, ci siano diversi tipi di energia potenziale. Abbiamo appena familiarizzato con l'energia potenziale gravitazionale di un sistema nel quale le componenti interagiscono tramite la forza gravitazionale. Esaminiamo un secondo tipo di energia potenziale che un sistema può possedere.

Consideriamo un sistema costituito da un blocco e da una molla come mostrato nella Figura 7.16. Nel Paragrafo 7.4, abbiamo considerato *solo* il blocco come sistema. Ora consideriamo sia il blocco che la molla nel sistema e riconosciamo che la forza elastica è l'interazione fra le due componenti del sistema. La forza che la molla esercita sul blocco è data da $F_s = -kx$ (Eq. 7.9). Il lavoro esterno compiuto da una forza applicata F_{app} su un sistema formato da blocco-molla è dato dall'Equazione 7.13:

$$W_{\text{est}} = \frac{1}{2}kx_f^2 - \frac{1}{2}kx_i^2 \quad (7.21)$$

In questa situazione, le coordinate x iniziale e finale del blocco sono misurate rispetto alla posizione di equilibrio, $x = 0$. Ancora una volta (come nel caso gravitazionale, Eq. 7.18) vediamo che il lavoro compiuto sul sistema è uguale alla differenza tra i valori iniziale e finale di una espressione che dipende dalla configurazione del sistema. La funzione **energia potenziale elastica** associata al sistema blocco-molla è definita da:

Energia potenziale elastica ▶

$$U_s \equiv \frac{1}{2}kx^2 \quad (7.22)$$

L'Equazione 7.21 può essere espressa come

$$W_{\text{est}} = \Delta U_s \quad (7.23)$$

Confrontare questa equazione con le Equazioni 7.17 e 7.20. In tutti e tre i casi, il lavoro esterno è compiuto su un sistema e una forma di conservazione di energia nel sistema cambia come risultato.

L'energia potenziale elastica del sistema può essere pensata come l'energia immagazzinata nella molla deformata (che può essere o compressa o allungata rispetto alla sua posizione di equilibrio). L'energia potenziale elastica immagazzinata nella molla è uguale a zero se la molla non è deformata ($x = 0$). L'energia è immagazzinata

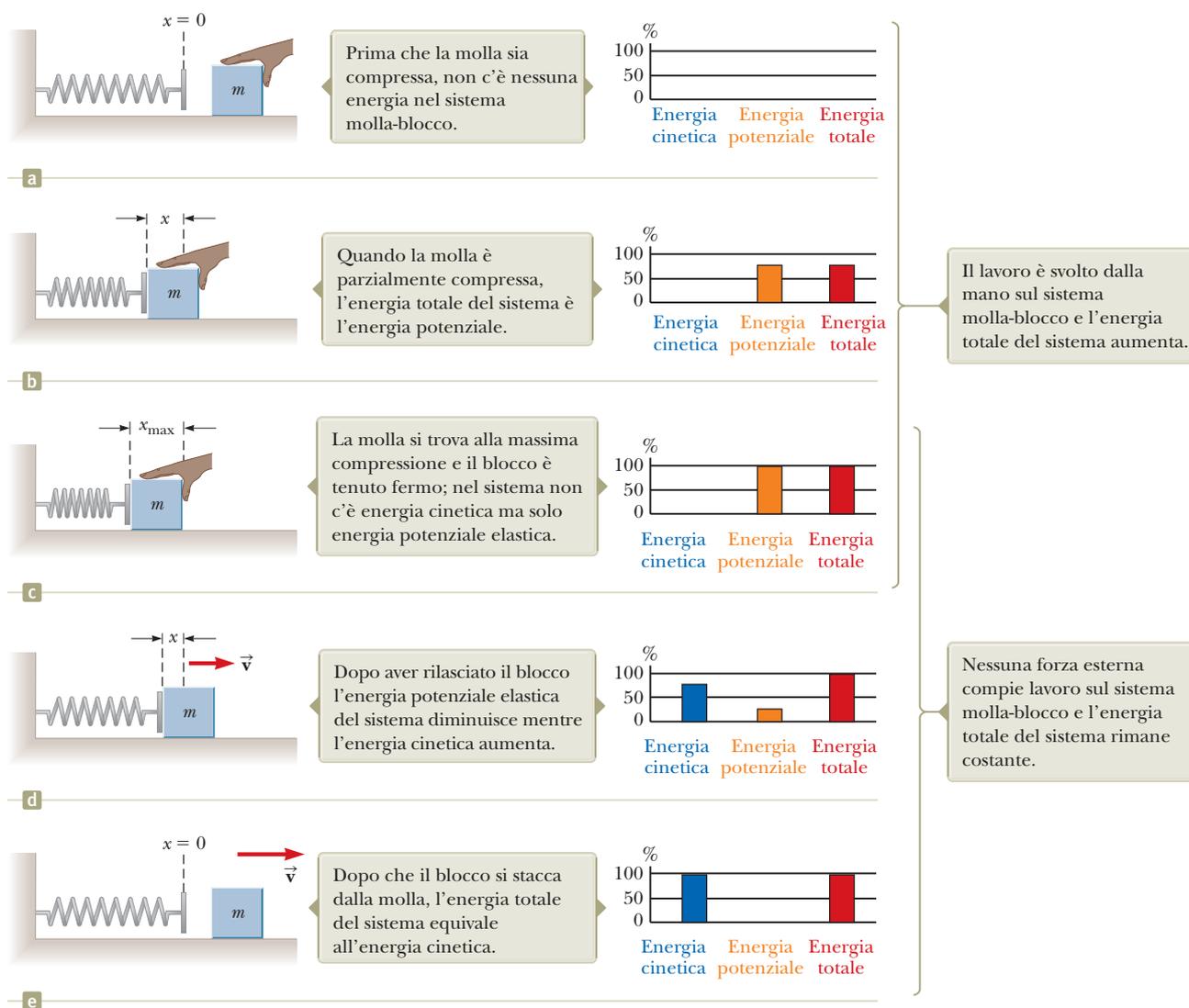


Figura 7.16 Una molla su una superficie orizzontale priva di attrito viene compressa di un tratto x_{\max} quando viene spinto contro di essa un blocco di massa m . In seguito il blocco viene rilasciato e la molla lo spinge verso destra, dove il blocco si stacca dalla molla. Le figure dalla (a) alla (e) mostrano i vari istanti del processo. Sulla destra di ogni figura è riportato il diagramma a barre dell'energia che ci aiuta a valutare l'energia nel sistema.

nella molla solo quando questa è allungata o compressa. Poiché l'energia potenziale elastica è proporzionale a x^2 , vediamo che U_s è sempre positiva in una molla deformata. Esempi quotidiani di conservazione dell'energia potenziale elastica possono essere trovati negli orologi stile antico o negli orologi che funzionano con la carica a molla e nei piccoli giocattoli per bambino a carica manuale.

Consideriamo nuovamente la Figura 7.16, che mostra una molla su una superficie orizzontale priva di attrito. Quando un blocco è spinto da un agente esterno contro la molla, l'energia potenziale elastica e l'energia totale del sistema aumentano come indicato nella Figura 7.16b. Quando la molla è compressa di un tratto x_{\max} (Fig. 7.16c), l'energia potenziale elastica immagazzinata nella molla è $\frac{1}{2}kx_{\max}^2$. Quando si rilascia il blocco con velocità nulla, la molla esercita una forza sul blocco e spinge il blocco a destra. L'energia potenziale elastica del sistema decresce, mentre l'energia cinetica aumenta e l'energia totale rimane la stessa (Fig. 7.16d). Quando il blocco ritorna alla sua lunghezza iniziale, l'energia potenziale elastica immagazzinata viene completamente trasformata in energia cinetica del blocco (Fig. 7.16e).



Figura 7.17 (Quiz 7.7) Una pallina è collegata ad una molla di massa trascurabile appesa verticalmente. Quali forme di energia potenziale sono associate al sistema quando la pallina è spostata verso il basso?

Quiz 7.7 Una pallina è collegata ad una molla di massa trascurabile appesa verticalmente come mostrato in Figura 7.17. Quando viene spinta verso il basso rispetto alla sua posizione di equilibrio e quindi lasciata libera, la pallina comincia ad oscillare. (i) Nel sistema costituito dalla pallina, dalla molla e dalla Terra, quali forme di energia si manifestano durante il moto? (a) energia cinetica ed energia potenziale elastica (b) energia cinetica ed energia potenziale gravitazionale (c) energia cinetica, potenziale elastica e potenziale gravitazionale. (d) energia potenziale elastica ed energia potenziale gravitazionale. (ii) Nel sistema costituito dalla pallina e dalla molla, quali forme di energia si manifestano durante il moto? Si scelga tra le stesse risposte del caso precedente.

Diagramma a barre dell'energia

La Figura 7.16 mostra un importante modo di rappresentare graficamente le informazioni legate all'energia dei sistemi, chiamato **diagramma a barre dell'energia**. L'asse verticale indica la percentuale di un dato tipo di energia presente nel sistema. L'asse orizzontale mostra i tipi di energia presenti nel sistema. Il diagramma a barre nella Figura 7.16a mostra che il sistema possiede un'energia uguale a zero poiché la molla è a riposo e il blocco è in quiete. Tra la Figura 7.16a e 7.16c, la mano compie lavoro sul sistema, comprimendo la molla e immagazzinando nel sistema energia potenziale elastica. Nella Figura 7.16d, il blocco è stato rilasciato e si muove verso destra, sempre in contatto con la molla. L'altezza della barra verticale dell'energia potenziale elastica diminuisce, la barra verticale dell'energia cinetica aumenta e la barra dell'energia totale rimane invariata. Nella Figura 7.16e, la molla torna alla sua lunghezza di riposo e il sistema ora possiede solo energia cinetica associata al blocco in movimento.

Il diagramma a barre dell'energia può essere una rappresentazione molto utile per tenere traccia dei vari tipi di energia in un sistema. Per esercizio, provate a compilare il diagramma a barre dell'energia per il sistema costituito dal libro e dalla Terra rappresentato in Figura 7.15 quando il libro è lasciato cadere dalla posizione più alta. La Figura 7.17 collegata al Quiz 7.7 mostra un altro sistema per il quale la rappresentazione grafica del diagramma a barre dell'energia sarebbe un ottimo esercizio. In alcune figure di questo capitolo si rappresenterà il diagramma a barre dell'energia.

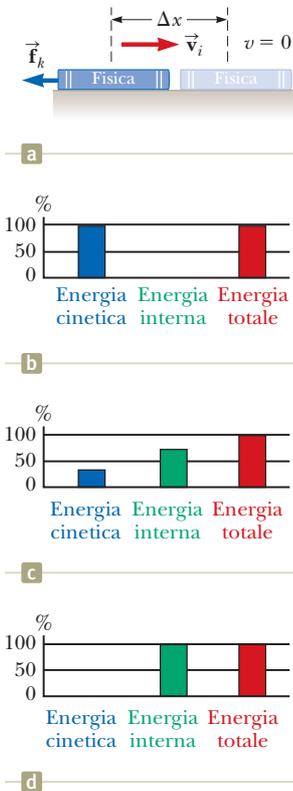


Figura 7.18 (a) Un libro che striscia verso destra fino a fermarsi su una superficie orizzontale in presenza di una forza di attrito dinamico diretta verso sinistra. (b) Un diagramma a barre dell'energia che mostra l'energia nel sistema libro-superficie nell'istante iniziale. L'energia del sistema è tutta cinetica. (c) Mentre il libro sta strisciando, l'energia cinetica del sistema diminuisce e si trasforma in energia interna. (d) Dopo l'arresto del libro l'energia del sistema è tutta energia interna.

7.7 Forze conservative e non conservative

Introduciamo ora un terzo tipo di energia che un sistema può possedere. Supponiamo che il libro mostrato nella Figura 7.18a sia stato accelerato dalla nostra mano e che ora si muova verso destra sulla superficie di un pesante tavolo decelerando a causa della forza di attrito. Consideriamo come sistema la *superficie*. La forza di attrito dovuta al libro che si muove compie lavoro sulla superficie. La forza agente sulla superficie è diretta verso destra, come pure lo spostamento del punto di applicazione della forza. Il lavoro compiuto sulla superficie è positivo, ma la superficie non si muove dopo che il libro si è fermato. È stato compiuto lavoro positivo sulla superficie senza che vi sia un aumento di energia cinetica o potenziale del sistema. Dov'è l'energia?

Dalla nostra esperienza quotidiana sull'attrito, possiamo supporre che la superficie sarà *più calda* dopo che il libro si sarà fermato. Il lavoro che è stato compiuto sulla superficie è stato usato per riscaldare la superficie piuttosto che per aumentare la sua velocità o modificare la configurazione di un sistema. L'energia associata alla temperatura di un sistema la chiamiamo **energia interna** ed è indicata con E_{int} . (In maniera più generale definiremo l'energia interna nel Capitolo 20.) Nel nostro caso, il lavoro compiuto sulla superficie rappresenta certamente energia trasferita al sistema, ma si manifesta nel sistema come energia interna piuttosto che come energia cinetica o potenziale.

Consideriamo il libro e la superficie nella Figura 7.18a come un unico sistema. Inizialmente il sistema possiede energia cinetica poiché il libro si muove. Dopo che il libro si è fermato l'energia interna del sistema è aumentata: il libro e la superficie sono più caldi di prima. L'energia cinetica è stata completamente trasformata in

energia interna. Possiamo considerare la forza non conservativa all'interno del sistema – cioè tra il libro e la superficie – come un *meccanismo di trasformazione* dell'energia. La forza non conservativa trasforma energia cinetica del sistema in energia interna. Basta strofinare energicamente le mani tra loro per provare questo risultato!

Le Figure 7.18b e 7.18d mostrano un diagramma a barre dell'energia per la situazione rappresentata nella Figura 7.18a. Nella Figura 7.18b il diagramma mostra che il sistema possiede energia cinetica nell'istante in cui il libro si stacca dalla mano. In tale istante assumiamo che il valore dell'energia interna del sistema sia zero. La Figura 7.18c mostra che l'energia cinetica si sta trasformando in energia interna appena il libro rallenta a causa della forza d'attrito. Nella Figura 7.18d, dopo che il libro ha smesso di scivolare, l'energia cinetica è zero e, ora, il sistema possiede solo energia interna E_{int} . Si noti che durante il processo, l'energia totale, rappresentata nei diagrammi in rosso, non è cambiata. La quantità di energia interna del sistema dopo che il libro si è fermato è uguale alla quantità di energia cinetica del sistema all'istante iniziale. Questa uguaglianza è descritta da un importante principio chiamato *conservazione dell'energia*. Approfondiremo questo principio nel Capitolo 8.

Consideriamo ora in maggior dettaglio un corpo che si muove verso il basso in prossimità della superficie terrestre. Il lavoro compiuto dalla forza gravitazionale non dipende dal fatto che il corpo cada verticalmente o scivoli lungo un piano inclinato con attrito. L'unica cosa che conta è la variazione di quota del corpo. Invece, la trasformazione di energia in energia interna dovuta all'attrito sul piano inclinato dipende dalla distanza percorsa dal corpo. In altre parole, il percorso seguito non ha importanza quando consideriamo il lavoro compiuto dalla forza gravitazionale, mentre c'è dipendenza dal percorso quando consideriamo la trasformazione di energia dovuta alle forze di attrito. Possiamo usare questa diversa dipendenza dal percorso per classificare le forze come *conservative* o *non conservative*. Delle due forze che abbiamo menzionato, la forza gravitazionale è conservativa mentre la forza di attrito è non conservativa.

Forze conservative

Le **forze conservative** godono delle due seguenti proprietà, tra loro equivalenti:

1. Il lavoro compiuto da una forza conservativa agente su un punto materiale che si muove tra due punti qualsiasi non dipende dal percorso.
2. Il lavoro compiuto da una forza conservativa agente su un punto materiale che descrive un qualsiasi percorso chiuso è nullo. (Un percorso chiuso è una linea in cui il punto di partenza e il punto di arrivo coincidono.)

La forza gravitazionale è un esempio di forza conservativa; la forza che una molla ideale esercita su un corpo qualsiasi collegato alla molla è un altro esempio di forza conservativa. Il lavoro compiuto dalla forza gravitazionale agente su un corpo che si sposta tra due punti qualsiasi in prossimità della superficie terrestre è $W_g = mg\hat{\mathbf{j}} \cdot [(y_f - y_i)\hat{\mathbf{j}}] = mgy_i - mgy_f$. Da questa equazione si nota che W_g dipende unicamente dalle coordinate y iniziale e finale del corpo ed è quindi indipendente dal percorso. Inoltre W_g è zero quando il corpo si muove lungo una linea chiusa (dove $y_i = y_f$).

Nel caso del sistema molla-corpo il lavoro W_m compiuto dalla forza elastica è dato da $W_s = \frac{1}{2}kx_i^2 - \frac{1}{2}kx_f^2$ (Eq. 7.12). Notiamo che la forza elastica è conservativa dato che W_s dipende solo dalle coordinate x iniziale e finale del corpo e vale zero per ogni percorso chiuso.

Possiamo introdurre una energia potenziale quando una forza agisce tra i costituenti di un sistema ma lo possiamo fare solo per le forze conservative. In generale, il lavoro W_{int} compiuto da una forza conservativa su un elemento di un sistema quando questo si sposta da un punto ad un altro è uguale alla differenza tra l'energia potenziale del sistema iniziale e quella finale:

$$W_{\text{int}} = U_i - U_f = -\Delta U \quad (7.24)$$

Il pedice “int” nell'Equazione 7.24 ci ricorda che il lavoro di cui stiamo parlando è compiuto da un membro su un altro del sistema e quindi *interno* al sistema, differen-

◀ Proprietà delle forze conservative

Prevenire l'errore 7.9

Attenzione alle equazioni che si somigliano Confrontiamo l'Equazione 7.24 con l'Equazione 7.20. Queste equazioni sono simili a parte il segno negativo, che è spesso fonte di confusione. L'Equazione 7.20 ci dice che il lavoro positivo compiuto da un agente esterno su un sistema provoca un aumento dell'energia potenziale del sistema (senza variazione di energia cinetica o energia interna). L'Equazione 7.24 stabilisce che il lavoro compiuto su un elemento di un sistema da parte di una forza conservativa *interna* ad un sistema isolato provoca una diminuzione dell'energia potenziale del sistema.

ziandosi dal lavoro W_{est} compiuto sull'intero sistema da un agente esterno. Come esempio, confrontiamo l'Equazione 7.24 con l'equazione del lavoro compiuto da un agente esterno su un sistema blocco-molla (Eq. 7.23) quando varia la lunghezza della molla.

Forze non conservative

Una forza è **non conservativa** se non soddisfa le proprietà 1 e 2 valide per le forze conservative. Il lavoro compiuto da una forza non conservativa, dipende dal percorso fatto. Definiamo la somma delle energie cinetica e potenziale di un sistema come l'**energia meccanica** del sistema:

$$E_{\text{mecc}} \equiv K + U \quad (7.25)$$

dove K comprende l'energia cinetica di tutte le parti mobili del sistema e U comprende tutti i tipi di energia potenziale del sistema. Se un libro cade sotto l'azione della forza gravitazionale, l'energia meccanica del sistema libro-Terra rimane invariata; l'energia potenziale si trasforma in energia cinetica e l'energia totale del sistema rimane la stessa. Le forze non conservative agenti all'interno del sistema provocano un *variazione* dell'energia meccanica del sistema. Per esempio, se un libro viene messo in moto su una superficie orizzontale che presenta attrito (Fig. 7.18a), l'energia meccanica del sistema libro-superficie viene trasformata in energia interna come discusso prima. Solo una parte dell'energia cinetica del libro si trasforma in energia interna del libro. La parte rimanente diventa energia interna della superficie. (Quando inciampate e scivolte sul pavimento di una palestra non solo la pelle dei vostri ginocchi si riscalda, ma anche il pavimento!) Poiché la forza di attrito dinamico trasforma l'energia meccanica di un sistema in energia interna, tale forza è non conservativa.

Come esempio della dipendenza dal percorso seguito del lavoro di una forza non conservativa, consideriamo la Figura 7.19. Supponiamo di spostare un libro tra due punti di un tavolo. Se il libro viene spostato in linea retta seguendo il percorso disegnato in blu tra i punti A e B in Figura 7.19, occorre compiere una data quantità di lavoro contro la forza di attrito dinamico per spostare il libro con velocità costante. Immaginiamo ora di spingere il libro lungo il percorso semicircolare disegnato in marrone in Figura 7.19. Occorre compiere contro la forza di attrito un lavoro maggiore di quello compiuto in uno spostamento rettilineo essendo più lungo il percorso. Il lavoro compiuto sul libro dipende dal percorso seguito, e quindi la forza di attrito *non può* essere conservativa.

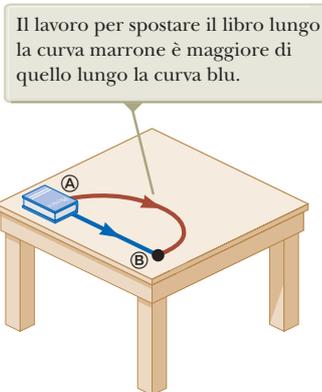


Figura 7.19 Il lavoro compiuto contro la forza di attrito dinamico dipende dal percorso seguito dal libro quando viene spostato da A a B.

7.8 Relazione tra forze conservative ed energia potenziale

Nel precedente paragrafo, abbiamo trovato che il lavoro compiuto su un elemento di un sistema da una forza conservativa agente tra elementi del sistema non dipende dal percorso fatto dall'elemento considerato. Il lavoro dipende solo dalle coordinate iniziali e finali. Possiamo definire una **funzione energia potenziale** U tale che il lavoro compiuto all'interno del sistema da una forza conservativa sia uguale alla variazione, cambiata di segno, dell'energia potenziale del sistema come riportato dall'Equazione 7.24. Immaginiamo un sistema di punti materiali nel quale una forza conservativa \vec{F} agisce fra le singole particelle e che la configurazione di tale sistema varia a causa del moto di un punto lungo l'asse x . Quindi, possiamo calcolare il lavoro interno compiuto da questa forza mentre il punto si muove lungo l'asse⁴ x tramite le Equazioni 7.7 e 7.24:

$$W_{\text{int}} = \int_{x_i}^{x_f} F_x dx = -\Delta U \quad (7.26)$$

⁴Per un generico spostamento, il lavoro compiuto in due o tre dimensioni è sempre uguale a $-\Delta U$, dove $U = U(x, y, z)$. Questa equazione si scrive formalmente come $W_{\text{int}} = \int_i^f \vec{F} \cdot d\vec{r} = U_i - U_f$.



SERWAY • JEWETT

Fisica

per Scienze ed Ingegneria



www.edises.it



€ 48,00

ISBN 978-88-7959-834-7



9 788879 598347