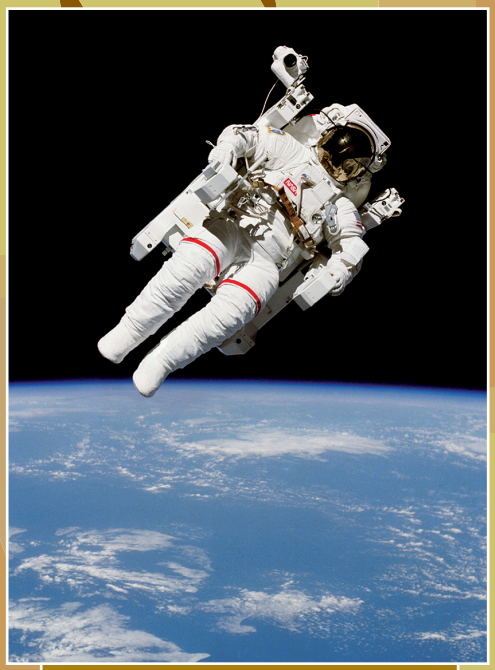
S. FOCARDI
I. MASSA
A. UGUZZONI
M. VILLA

FISICA GENERALE

Meccanica e Termodinamica

II edizione



Casa Editrice Ambrosiana

S. FOCARDI

I. MASSA

A. UGUZZONI

M. VILLA

Dipartimento di Fisica e Astronomia
dell'Università di Bologna

FISICA GENERALE

Meccanica e Termodinamica

II edizione

Casa Editrice Ambrosiana

INDICE

PREFAZIONE xv

CAPITOLO 1 GRANDEZZE FISICHE 1

1-1 Introduzione 2
1-2 Il metodo scientifico 2
1-3 Leggi della Fisica e Principi 4
1-4 I modelli in Fisica 7
1-5 Grandezze fisiche e loro misurazione 7
1-6 Metodi di misurazione 8
1-7 Dimensioni delle grandezze fisiche 9
1-8 Sistemi di unità di misura 12
1-9 Errori 13
1-10 Tempo 14
1-11 Lunghezza 16
1-12 Massa 17
1-13 Misure e indeterminazione 18

APPROFONDIMENTI

1-14 Misure di tempo 20
1-14-1 Il secondo 20
1-14-2 Misure indirette di tempo 21
1-14-3 Misure di tempi di reazione nucleare 22
1-15 Misure di lunghezza 22
1-15-1 Il metro 22
1-15-2 Metodo della triangolazione 23
1-15-3 Metodi basati su misure di tempo 24
1-15-4 Metodi per distanze astronomiche 25
1-15-5 Metodi per dimensioni nucleari 26

COMPLEMENTI

1-16 Legge del decadimento 27

 ISBN 978-88-08-18215-9

1-17 Errori 28
1-17-1 Errori sistematici ed errori casuali 28
1-17-2 Risultato di una misurazione 30
1-17-3 Distribuzione di Gauss 30
1-17-4 Distribuzione di Poisson 32
1-17-5 Propagazione degli errori 33
1-18 Cifre significative 33
1-19 Leggi fisiche e analisi dimensionale 34
Problemi 36
Risultati 37
Riepilogo di alcune relazioni significative 37

CAPITOLO 2 **CALCOLO VETTORIALE** **39**
2-1 Grandezze scalari e grandezze vettoriali 40
2-2 Notazioni e definizioni vettoriali 41
2-3 Somma e differenza di vettori 42
2-4 Prodotto di uno scalare per un vettore 43
2-5 Versori 44
2-6 Scomposizione di vettori 45
2-7 Prodotto scalare 46
2-8 Prodotto vettoriale 48
2-9 Rappresentazione cartesiana ortogonale 50
2-10 Equivalenza fra le rappresentazioni vettoriali 51
2-11 Espressioni cartesiane delle operazioni fra vettori 52
2-12 Derivazione di vettori 54
2-13 Derivate di versori e di vettori 55
2-14 Momento di un vettore applicato 57
2-15 Vettore posizione e sistemi di coordinate 58
2-16 Coordinate polari piane 60
APPROFONDIMENTI 2-17 Vettori e proprietà di trasformazione 61
2-17-1 Traslazioni 62
2-17-2 Rotazioni attorno a uno degli assi 62
2-17-3 Riflessione speculare 64
2-18 Prodotti tripli 65
2-19 Sistemi di vettori applicati 66
COMPLEMENTI 2-20 Operatore Nabla 69
2-21 Coordinate polari e cilindriche 71
2-21-1 Coordinate polari sferiche 71
2-21-2 Coordinate polari cilindriche 72
2-21-3 Gradiente, divergenza, rotore e laplaciano 73
Problemi 74
Risultati 75
Riepilogo di alcune relazioni significative 75

CAPITOLO 3 **CINEMATICA** **77**
3-1 Introduzione 78
3-2 Moto e sistemi di riferimento 78
3-3 Lo schema del punto materiale 79
3-4 Equazione vettoriale del moto: traiettoria e legge oraria 80
3-5 Introduzione al concetto di velocità 83
3-6 Il vettore velocità 84
3-7 Rappresentazione intrinseca della velocità 85
3-8 Rappresentazione cartesiana della velocità 87

3-9 Accelerazione 89
3-10 Espressione intrinseca dell'accelerazione 92
3-11 Classificazione di moti elementari 95
3-11-1 Moti con $\dot{s}$ = costante 95
3-11-2 Moti con $\ddot{s}$ = costante 96
3-12 Moti rettilinei 97
3-13 Moti circolari 98
3-13-1 Geometria e versori intrinseci della traiettoria 99
3-13-2 Moto circolare uniforme 99
3-13-3 Moto circolare uniformemente vario 100
3-13-4 Grandezze angolari 100
3-13-5 Periodicità del moto circolare uniforme 103
3-13-6 Equazioni differenziali nel moto circolare uniforme 104
3-14 Moto oscillatorio armonico 105
3-15 Moto piano in coordinate polari 107
3-16 Il problema inverso della cinematica 110
3-17 Moto con accelerazione costante: i gravi 111
3-18 Cinematica dei moti relativi: introduzione 118
3-19 Leggi di trasformazione di velocità e accelerazione 119
3-20 Moto relativo di traslazione rettilinea 122
3-21 Trasformazioni di Galileo 123
3-22 Moto relativo di rotazione 126
3-23 Moto relativo di rototraslazione 128
APPROFONDIMENTI 3-24 Velocità e accelerazione nei moti relativi 129
3-24-1 Derivate di vettori e sistemi di riferimento 129
3-24-2 Trasformazioni delle velocità 131
3-24-3 Trasformazioni delle accelerazioni 131
3-25 Problema inverso nel moto unidimensionale 132
COMPLEMENTI 3-26 Cinematica e proprietà geometriche delle curve 134
3-27 Moto in coordinate polari 136
3-28 Le relazioni di Poisson 137
Problemi 138
Risultati 141
Riepilogo di alcune relazioni significative 141

CAPITOLO 4 **I PRINCIPI DELLA DINAMICA** **143**
4-1 Introduzione 144
4-2 Interazioni e ambiente 144
4-3 Forze 145
4-4 Definizione operativa delle forze 147
4-5 Reazioni vincolari 149
4-6 Introduzione ai Principi della Dinamica 150
4-7 Primo Principio della Dinamica 151
4-7-1 Le indicazioni sperimentali 151
4-7-2 I sistemi di riferimento inerziali 152
4-8 Secondo Principio della Dinamica 154
4-9 Massa inerziale 157
4-10 Principio di Azione e Reazione 158
4-11 Quantità di moto e impulso 160
4-12 Momento angolare 163
APPROFONDIMENTI 4-13 Massa e peso 165
4-14 Misure indirette di massa 167
4-15 Massa e costituzione della materia 167
4-16 Misura dinamica delle forze 169

 ISBN 978-88-08-18215-9

4-17 Principio di relatività e covarianza delle leggi fisiche 170
4-18 Interazioni fondamentali 173
4-18-1 Interazione gravitazionale 175
4-18-2 Interazione elettrodebole 176
4-18-3 Interazione nucleare forte 177
4-19 Campi di forze 178
Problemi 179
Risultati 182
Riepilogo di alcune relazioni significative 182

CAPITOLO 5 **APPLICAZIONI DEI PRINCIPI DELLA DINAMICA** **185**

5-1 Introduzione 186
5-2 Forze costanti 186
5-3 Forze elastiche e legge di Hooke 191
5-4 Il pendolo semplice 198
5-5 Forze che dipendono dalla velocità 199
5-6 Attrito radente 201
5-6-1 Attrito statico 201
5-6-2 Attrito dinamico 202
5-6-3 Attrito e locomozione 204
5-7 Dinamica di moti circolari 206
5-8 Dinamica nei sistemi di riferimento non inerziali 210
5-8-1 La dinamica in un treno accelerato 211
5-8-2 Non equivalenza dei sistemi di riferimento non inerziali 213
5-8-3 La dinamica in un ascensore accelerato 215
5-8-4 La dinamica su una piattaforma rotante 217
5-9 Sistema di riferimento terrestre 220
COMPLEMENTI
5-10 Oscillazioni smorzate 223
5-11 Oscillazioni forzate e risonanza 224
Problemi 226
Risultati 229
Riepilogo di alcune relazioni significative 230

CAPITOLO 6 **ENERGIA E LAVORO** **233**

6-1 Introduzione 234
6-2 Lavoro di una forza 234
6-3 Energia cinetica - Teorema delle forze vive 237
6-4 Campi di forze conservativi 240
6-5 Alcuni campi conservativi 243
6-5-1 Forza peso 243
6-5-2 Forza elastica 244
6-5-3 Forze centrali a simmetria sferica 245
6-5-4 Forza centrifuga 248
6-5-5 Superfici equipotenziali 250
6-6 Forze non conservative 250
6-7 Conservazione dell'energia meccanica 251
6-7-1 Energia meccanica nei problemi unidimensionali 254
6-7-2 Alcune avvertenze sulla conservazione dell'energia meccanica 256
6-8 Trasformismo dell'energia 258
6-8-1 Energia negli oscillatori 258
6-8-2 Trasferimenti di energia in sistemi più complessi 261
6-9 Macchine semplici 263

6-10 Potenza 264
6-11 Conservazione dell'energia 266
APPROFONDIMENTI 6-12 Energia potenziale e stabilità dell'equilibrio 268
6-13 Energia meccanica e sistemi a un grado di libertà 273
6-14 Lavoro, energia e sistemi di riferimento 276
Problemi 277
Risultati 280
Riepilogo di alcune relazioni significative 281

CAPITOLO 7 **DINAMICA DEI SISTEMI** **283**
7-1 Introduzione 284
7-2 Centro di massa 284
7-2-1 Sistemi discreti 284
7-2-2 Sistemi continui 286
7-3 Quantità di moto e moto del centro di massa 289
7-3-1 Moto del centro di massa 290
7-3-2 Conservazione della quantità di moto 293
7-4 Momento angolare di un sistema 295
7-5 Equazioni cardinali 298
7-6 Sistemi isolati e Terzo Principio della Dinamica 300
7-7 Sistemi di forze parallele e baricentro 302
7-8 Moto rispetto al centro di massa e teoremi di König 304
7-8-1 Momento angolare 304
7-8-2 Energia cinetica 305
7-9 Lavoro ed energia 306
7-9-1 Lavoro delle forze interne 307
7-9-2 Energia meccanica, energia propria ed energia interna 308
7-9-3 Pseudolavoro 311
7-10 Sistemi di due corpi 313
7-11 Moto relativo di due corpi 316
7-12 Fenomeni d'urto 320
7-12-1 Introduzione 320
7-12-2 La conservazione di grandezze dinamiche negli urti 321
7-12-3 Limitazioni derivanti dai Principi di conservazione 323
7-13 Urti unidimensionali 324
7-13-1 Urti semplici nel piano 325
APPROFONDIMENTI 7-14 Collisioni fra due corpi e moto relativo 328
7-14-1 Collisioni elastiche 329
7-14-2 Collisioni anelastiche 329
7-14-3 Moto relativo e urti centrali elastici 330
7-14-4 Coefficiente di anelasticità 331
7-15 Urti e interazioni 332
7-16 Diffusione elastica in un campo coulombiano 333
COMPLEMENTI 7-17 Moto dei razzi 337
Problemi 339
Risultati 341
Riepilogo di alcune relazioni significative 342

CAPITOLO 8 **CORPI RIGIDI** **343**
8-1 Introduzione 344
8-2 Cinematica dei sistemi rigidi 345
8-2-1 Moti traslatori puri 345

 ISBN 978-88-08-18215-9

8-2-2 Moti rotatori con asse fisso 346
8-2-3 Moti rotatori con asse variabile 348
8-3 Momento di inerzia 349
8-4 Dinamica dei sistemi rigidi con asse fisso 354
8-4-1 L'equazione del moto 354
8-4-2 Assi di rotazione e assi di simmetria 356
8-4-3 Pendolo fisico 358
8-4-4 Pendolo di torsione 359
8-5 Conservazione del momento angolare assiale 361
8-6 Energia cinetica di un sistema rigido 363
8-7 Lavoro delle forze agenti sui sistemi rigidi 365
8-8 Energia e moto di sistemi rigidi 367
8-9 Attrito volvente 370
8-10 Statica dei sistemi rigidi 372
8-11 Fenomeni elastici 376
APPROFONDIMENTI 8-12 Trasferimenti di impulso e momento angolare 378
8-13 Stabilità dell'equilibrio 383
8-14 Moti giroscopici 386
COMPLEMENTI 8-15 Dinamica del rotolamento puro 388
8-16 Tensore d'inerzia 394
8-16-1 Dinamica rotazionale con il tensore d'inerzia 395
8-16-2 Energia rotazionale con il tensore d'inerzia 396
Problemi 396
Risultati 400
Riepilogo di alcune relazioni significative 401

CAPITOLO 9 **GRAVITAZIONE** **403**
9-1 Introduzione 403
9-2 Legge di gravitazione 404
9-3 Massa inerziale e massa gravitazionale 407
9-4 Legge di Newton e leggi di Keplero 410
9-5 Campi centrali a simmetria sferica 412
9-6 Orbite circolari nel campo gravitazionale 415
APPROFONDIMENTI 9-7 Costante gravitazionale *G* 417
9-8 Accelerazione di gravità 420
9-8-1 Effetti non inerziali 420
9-8-2 Effetti di marea 422
9-9 Gravitazione e cosmologia 424
9-9-1 Densità e destino dell'Universo 425
9-9-2 I buchi neri 425
COMPLEMENTI 9-10 Forza gravitazionale di una sfera omogenea 426
9-11 Prima legge di Keplero 428
9-12 Gravitazione ed esplorazioni spaziali 433
Problemi 435
Risultati 437
Riepilogo di alcune relazioni significative 437

CAPITOLO 10 **ELEMENTI DI MECCANICA DEI FLUIDI** **439**
10-1 Introduzione 439
10-2 Densità 440
10-3 Pressione 441
10-4 Equazione della statica 442
10-4-1 Legge di Stevino e Legge di Pascal 444

10-4-2 La pressione atmosferica 445
10-4-3 Dipendenza della pressione atmosferica dalla quota 446
10-5 Misurazioni di pressione 447
10-6 Legge di Archimede 448
10-6-1 Statica del galleggiamento 449
10-7 Dinamica dei fluidi 450
10-8 Equazione di continuità 452
10-9 Teorema di Bernoulli 452
10-9-1 Tubo di Venturi 454
10-9-2 Tubo di Pitot 455
APPROFONDIMENTI 10-10 Fluidi reali 455
10-11 Resistenza del mezzo 457
COMPLEMENTI 10-12 Energia e galleggiamento 459
Problemi 461
Risultati 463
Riepilogo di alcune relazioni significative 463

CAPITOLO 11 **FENOMENI ONDULATORI** **465**
11-1 Introduzione 466
11-2 Equazione di D'Alembert 467
11-2-1 Onde piane 469
11-2-2 Onde sferiche 471
11-3 Onde piane armoniche (o monocromatiche) 472
11-3-1 Sovrapposizione di onde 473
11-3-2 Rappresentazione complessa e somma delle onde 474
11-3-3 Interferenza 475
11-4 Battimenti e velocità di gruppo 478
11-4-1 Velocità di gruppo 480
11-5 Onde trasversali su una corda 481
11-6 Onde longitudinali in una sbarra solida 483
11-7 Onde elastiche nei gas 484
11-7-1 Velocità del suono in aria 486
11-7-2 Onde di pressione e di densità 487
11-8 Energia trasportata dalle onde elastiche 487
11-8-1 Energia e potenza nelle onde monocromatiche 490
11-9 Impedenza dei mezzi 492
11-9-1 Onde su una corda 492
11-9-2 Onde longitudinali 493
11-10 Trasmissione e riflessione di onde elastiche 494
11-10-1 Riflessioni all'estremo di una corda 498
11-11 Onde stazionarie su una corda 499
11-11-1 Onde stazionarie su una corda con estremi fissi 500
11-11-2 Onde stazionarie su una corda con un solo estremo fisso 502
11-11-3 Onde stazionarie nei gas 503
11-11-4 Energia nelle onde stazionarie 503
11-12 Intensità e velocità del suono 505
11-13 Effetto Doppler 506
11-13-1 Sorgenti ad alte velocità e onde d'urto 509
COMPLEMENTI 11-14 Onde elastiche nei solidi 509
11-14-1 Cenni alle onde sismiche 511
11-15 Corda vibrante e analisi armonica 511
11-15-1 Analisi di Fourier delle funzioni periodiche 514
Problemi 516
Risultati 518

 ISBN 978-88-08-18215-9

Riepilogo di alcune relazioni significative 518

CAPITOLO 12 **SISTEMI TERMODINAMICI** **521**

12-1 Introduzione 522
12-2 Coordinate termodinamiche 523
12-3 Pareti adiabatiche e diatermiche: equilibrio termico 524
12-4 Principio zero e temperatura 526
12-5 Temperatura del termometro a gas perfetto 529
12-6 Dilatazione termica 531
12-7 Trasformazioni termodinamiche 532
12-8 Termostati (serbatoi, sorgenti) 534
12-9 Equazione di stato dei gas 535
12-9-1 Gas ideali 536
12-9-2 Gas reali 540
12-10 Lavoro termodinamico 542
12-10-1 Lavoro dei gas ideali 545
12-10-2 Lavoro dell'attrito e reversibilità 547
12-11 Metodo statistico 548
COMPLEMENTI 12-12 Stati di aggregazione e punto triplo 552
12-12-1 Punto triplo 553
Problemi 553
Risultati 555
Riepilogo di alcune relazioni significative 555

CAPITOLO 13 **PRIMO PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA** **557**

13-1 Energia e sistemi termodinamici 557
13-2 Lavoro adiabatico ed energia interna 558
13-3 Primo Principio e calore 560
13-4 Trasmissione del calore 564
13-4-1 Conduzione 564
13-4-2 Convezione 565
13-4-3 Irraggiamento 566
13-5 Capacità termica 568
13-5-1 Equilibrio termico tra due corpi 569
13-5-2 Calore molare di sistemi idrostatici 571
13-5-3 Calore molare nei solidi e calore latente 573
13-6 Proprietà dei gas ideali 573
13-6-1 Energia interna 573
13-6-2 Capacità termica e relazione di Mayer 574
13-6-3 Trasformazioni adiabatiche quasi-statiche 576
13-6-4 Trasformazioni politropiche 576
13-7 Aspetti microscopici 579
APPROFONDIMENTI 13-8 Equazioni di Clapeyron 581
13-9 Relazione fra i calori molari 584
COMPLEMENTI 13-10 Esperimento di Joule 585
Problemi 587
Risultati 589
Riepilogo di alcune relazioni significative 589

CAPITOLO 14 **SECONDO PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA** **591**

14-1 Introduzione 592
14-2 Come ottenere lavoro da un serbatoio di calore 592
14-3 Enunciato di Kelvin-Planck: macchine termiche 593

14-4 Enunciato di Clausius: macchine frigorifere 595
14-5 Equivalenza dei due enunciati 596
14-6 Macchine reversibili e ciclo di Carnot 597
14-7 Teorema di Carnot 597
14-8 Macchina reversibile a gas perfetto 598
14-9 Temperatura termodinamica assoluta 599
14-10 Prestazioni delle macchine termiche 600
14-11 Teorema di Clausius 605
14-12 La funzione di stato entropia 606
14-12-1 Entropia e serbatoi di calore 608
14-13 Entropia e trasformazioni nei sistemi isolati 609
14-14 Secondo principio della termodinamica 614
14-15 Entropia e rendimento delle macchine termiche 615
14-16 Traccia di una trasformazione 616
14-17 Entropia dei sistemi idrostatici e piano $[S, T]$ 620
14-18 Energie libere 622
14-19 Entropia e probabilità 623
14-19-1 Entropia e disordine 626
COMPLEMENTI 14-20 Entropia e informazione 628
14-21 Trasformazioni termiche 629
APPROFONDIMENTI 14-22 Temperatura assoluta 630
14-23 Ciclo di Carnot ed equazioni di Clapeyron 632
14-24 Sulla definizione di gas perfetto 633
Problemi 635
Risultati 637
Riepilogo di alcune relazioni significative 637

CAPITOLO 15 **ELEMENTI DI MECCANICA RELATIVISTICA** **639**

15-1 Introduzione 640
15-1-1 Principi della Relatività 641
15-2 La velocità limite 642
15-3 Spazio, tempo e sistemi di riferimento 643
15-3-1 Osservatori e procedure di misurazione 643
15-3-2 Necessità di una revisione dei concetti di spazio e di tempo 644
15-3-3 Moto relativo e lunghezze trasversali 645
15-4 Simultaneità 645
15-5 Dilatazione del tempo 647
15-5-1 Verifiche sperimentali 650
15-6 Contrazione delle lunghezze 651
15-7 Relatività e trasformazioni di Lorentz 652
15-7-1 Trasformazioni di velocità e accelerazioni 654
15-8 Introduzione alla dinamica relativistica 656
15-9 Energia 657
15-9-1 Energia cinetica 657
15-9-2 Energia a riposo e massa 658
15-9-3 Energia, massa e quantità di moto 659
15-9-4 Fotoni e particelle di massa nulla 660
15-10 Forza, accelerazione e massa 661
15-11 Equivalenza massa-energia 663
15-11-1 La formula di Einstein 663
15-11-2 Alcune trasformazioni massa-energia 663
15-11-3 Difetto di massa ed energia di legame 664

ISBN 978-88-08-18215-9

COMPLEMENTI

15-12 Conservazione della quantità di moto negli urti 664
15-12-1 Conservazione della quantità di moto e dell'energia di un sistema isolato di particelle 668

APPROFONDIMENTI

15-13 La misura della velocità della luce 670
15-14 L'etere e l'esperimento di Michelson e Morley 671
15-15 Quadrivettori e meccanica relativistica 673
15-15-1 Energia di un sistema di particelle interagenti. 677
Problemi 679
Risultati 681
Riepilogo di alcune relazioni significative 682

APPENDICE 683
A-1 Funzioni 683
A-2 Derivate e differenziali 684
A-3 Proprietà delle derivate 686
A-4 Derivate parziali 688
A-5 Approssimazione delle funzioni con polinomi 689
A-6 Integrali 690
A-7 Equazioni differenziali 693
A-8 Integrali curvilinei 695
A-9 Numeri complessi 697

PREMI NOBEL 701

INDICE ANALITICO 705

PREFAZIONE

La prima edizione di questo testo, che risale al 1999, ha continuato a essere apprezzata nonostante i cambiamenti introdotti da allora nella struttura e articolazione dei corsi di studio universitari. Abbiamo ricevuto tuttavia stimolanti segnalazioni di vari punti in cui il testo poteva essere migliorato e integrato, in particolare al fine di renderlo ancora più adatto agli studenti del primo anno dei corsi di laurea in Fisica. Oltre a ciò, da più parti si è manifestato interesse per una nuova articolazione che contenga anche sezioni separate dedicate a problemi da risolvere, dove gli studenti possano verificare la propria preparazione.

Abbiamo quindi realizzato una accurata revisione di tutto il testo, adeguatamente integrato con nuovo materiale: naturalmente facendo tesoro dei suggerimenti e delle critiche, ma mantenendo fede ai nostri principi ispiratori, ben descritti nella prefazione alla prima edizione (che qui di seguito riportiamo).

Spiegare la fisica non è compito facile, perché questa disciplina non è un semplice insieme di leggi e di relazioni, come molti a torto ritengono, ma la chiave di volta per interpretare il mondo nel quale viviamo. Osservatori superficiali hanno spesso grandi difficoltà nell'individuare punti di contatto fra una qualsiasi relazione della fisica e i problemi concreti della nostra vita quotidiana: la realtà che ci circonda è assai variegata e a prima vista poco incline a lasciarsi descrivere con formule (apparentemente) astratte. E invece tali relazioni sono proprio estremamente concrete. Leggendole e interpretandole con gli strumenti appropriati, infatti, ci si accorge che esse permettono sia di fare previsioni sui fenomeni naturali sia di spiegare i principi di funzionamento delle apparecchiature che concorrono a semplificare la nostra vita. D'altra parte, la ricerca delle leggi fondamentali della Fisica, che per la loro generalità possiedono anche un profondo significato filosofico, si è sviluppata attraverso un affascinante processo che ha coinvolto un grande numero di sperimentatori e molte fra le menti più geniali della storia dell'umanità, e che ha portato all'affermazione definitiva del metodo di indagine scientifica della realtà. Uno degli aspetti più importanti della Fisica, che secondo noi deve riflet-

 ISBN 978-88-08-18215-9

tersi in forma adeguata anche nel suo insegnamento, è proprio la capacità di fare acquisire tale modo di ragionare, che sta alla base di tutte le scienze, siano esse pure, sperimentali o tecnologiche. L'esigenza di un'efficace trasmissione di questi strumenti intellettuali alle giovani generazioni è ancor più sentita in questo particolare momento storico, in cui sembrano voler prevalere tendenze irrazionali e antiscientifiche. Nello scrivere in quest'ottica un libro di Fisica per l'Università, da un lato si deve far fronte alla necessità di un sufficiente rigore, dato che, specie in ambito scientifico, l'eccessiva semplificazione è spesso fuorviante e dà solo l'illusione della comprensione; d'altro canto, non si può trascurare la sempre maggiore interazione fra sistema formativo e mondo della produzione, che sta imponendo profonde trasformazioni a strutture e metodi della didattica universitaria. In questo contesto non risulta facile conciliare tutte le esigenze, individuando inoltre gli strumenti appropriati per rendere accattivanti le materie di studio e per aiutare gli studenti ad acquisire solide conoscenze di base in un tempo ragionevole. Nello sviluppare gli argomenti trattati si è cercato di dare particolare risalto ad alcuni aspetti peculiari della disciplina:

- la fisica si basa sempre sull'esperienza;
- la fisica descrive il mondo reale mediante modelli e schematizzazioni;
- i modelli non possono essere in contrasto con l'esperienza e valgono solo in quanto permettono di comprendere i fatti reali;
- le teorie fisiche continuano a subire un'evoluzione, che ha portato nel tempo a estenderne o a limitarne la validità;
- l'applicazione delle leggi della fisica nella soluzione dei problemi richiede un'appropriata impostazione e una ben precisa metodologia.

Naturalmente, al di là delle buone intenzioni, non sempre è stato possibile rendere esplicite, nel corso del volume, tutte queste linee guida. Lo studente attento potrà tuttavia cogliere il tentativo di sviluppare ciascun argomento lungo una di esse, generalmente la più adatta. Gli argomenti sono presentati a un livello che richiede una buona conoscenza della Matematica: di norma ogni corso di Fisica è preceduto o accompagnato da corsi di matematica. D'altro canto, una trattazione di livello generale e che poggi su rigorose basi formali, pur dando inizialmente la sensazione di maggiore difficoltà, si traduce invece in una notevole economia intellettuale, perché permette di non affrontare in modo indipendente tutti i casi particolari e le varie applicazioni.

Come anticipato nella parte introduttiva, in questa nuova edizione abbiamo mantenuto l'impostazione generale, cercando di migliorarla nelle sue parti più delicate.

Le modifiche più rilevanti riguardano i capitoli 11 e 15. Il primo, dedicato ai fenomeni ondulatori, è stato quasi completamente riscritto e contiene ora una più completa trattazione delle onde meccaniche nei solidi e nei gas; nel secondo, l'introduzione alla meccanica relativistica è stata integrata con una più ampia trattazione della dinamica relativistica. In diversi capitoli l'articolazione in paragrafi è stata riorganizzata, al fine di rendere più chiare ai lettori la successione e la descrizione degli argomenti trattati; in particolare ciò è avvenuto nel capitolo su lavoro ed energia e nel capitolo sul secondo principio della termodinamica (nel quale si introduce e si approfondisce il concetto di entropia).

Un ulteriore salto di qualità rispetto alla prima edizione del libro riguarda l'inserimento, alla fine di ogni capitolo, di una sezione dedicata ai problemi, numerosi e con diversi gradi di difficoltà. Per ciascuno di essi vengono fornite sia la soluzione simbolica sia quella numerica. I problemi e le soluzioni fornite dovrebbero

accompagnare gli studenti nella comprensione degli argomenti trattati nel capitolo e nella preparazione delle prove di esame.

Desideriamo sottolineare anche due accorgimenti grafici che dovrebbero aiutare gli studenti nelle loro fatiche. Anzitutto l'aggiunta di una freccia sopra le lettere (in grassetto) che indicano grandezze vettoriali; e inoltre, una segnalazione (un vistoso punto esclamativo) a fianco delle frasi o dei concetti che richiedono una particolare attenzione. !

Abbiamo mantenuto e razionalizzato una struttura a più livelli: in ogni capitolo a una parte di contenuto più generale, e anche più elementare, fanno seguito due successive sezioni, una dedicata ai complementi, l'altra agli approfondimenti. Tale struttura lascia al docente una notevole autonomia di scelta, permettendogli eventualmente di privilegiare alcuni aspetti più specialistici, se consoni alle finalità del proprio insegnamento, anche a scapito di argomenti di carattere più generale.

Dal punto di vista dello studente, i livelli in realtà sono molto spesso quattro: in diverse occasioni, infatti, per alleggerire la trattazione e accrescere il numero degli esempi di facile soluzione, ci siamo limitati ad anticipare nel corpo centrale i risultati, rinviando la dimostrazione formale alla soluzione degli esempi. Affrontare gli esempi e i problemi costituisce un banco di prova insostituibile per lo studente, perché gli offre la possibilità di autovalutarsi: purché naturalmente egli si impegni davvero a risolverli, ricorrendo alla soluzione solo se si rende necessario l'aiuto del libro. Tutto ciò richiede impegno personale, che va dedicato anche a sviluppare la precisione del linguaggio, un indice non trascurabile della chiarezza delle proprie idee: nessun professore, per quanto brillante, e nessun libro, per quanto ben fatto, potranno mai sollevare gli studenti dal compito, che loro resta, di assimilare le idee portanti della disciplina. L'esperienza derivante da molti anni di insegnamento ci suggerisce di consigliare allo studente di curare, fin dalle prime battute, l'acquisizione dei concetti, anche di quelli che possono sembrargli elementari, verificando di essere riuscito a farli propri.

La Fisica è una disciplina in continuo sviluppo ed evoluzione, e affronta sovente temi affascinanti sul piano culturale. Senza snaturare i fini di questo libro, quando è stato possibile si è cercato di mettere in evidenza questi aspetti.

Ci è gradito esprimere un caloroso ringraziamento al prof. Paolo Maurenzig per le critiche costruttive e per i suggerimenti; e ai colleghi che con le loro proposte hanno contribuito alla precedente edizione.

Vogliamo inoltre ringraziare la Casa Editrice Ambrosiana e in particolare il dott. Stefano Villani e la dott.ssa Natalia Nanni per la preziosa collaborazione e l'eccellente lavoro di redazione.

Ringraziamo in anticipo coloro che ci segnaleranno l'esistenza di imprecisioni e di refusi, o che vorranno contribuire a migliorare quest'opera soprattutto attraverso le loro critiche, rivolgendosi a chiunque di noi all'indirizzo @bo.infn.it preceduto dal cognome.

Il destino ha voluto che accanto all'entrata fra di noi del collega prof. Mauro Villa, senza il quale un lavoro così impegnativo non sarebbe stato ragionevolmente possibile, ci venisse a mancare, proprio sul filo di lana, l'esperienza e la passione, la cultura del caro prof. Sergio Focardi, al quale vogliamo dedicare il risultato di questo lavoro.

Gli Autori

CAPITOLO 1

GRANDEZZE FISICHE

Compendio

Il metodo scientifico nasce dalle ricerche di Galileo. La Fisica basa la sua conoscenza sui fatti sperimentali; costruisce modelli dei processi naturali e li inquadra in teorie. Alla base vi sono le Leggi fisiche e i Principi; in essi figurano relazioni fra grandezze fisiche, entità che possono essere misurate. Ogni grandezza è definita con il metodo operativo, descrivendo cioè i modi in cui viene misurata. Il processo con cui si associa un numero (misura) a una grandezza è la misurazione; il suo risultato, espresso in termini dell'unità di misura, va completato con l'indicazione della sua precisione, mediante l'assegnazione dell'errore. I metodi di misurazione si distinguono in diretti, indiretti o strumentali. Ogni grandezza ha una specifica proprietà detta dimensione. Le dimensioni di alcune grandezze, chiamate fondamentali, sono utilizzate per ricavare quelle delle grandezze derivate, cioè collegate alle prime da qualche legge fisica. Le equazioni della Fisica sono relazioni fra grandezze fisiche e devono essere dimensionalmente corrette. La scelta delle grandezze fondamentali e delle relative unità definisce un sistema di unità di misura; le unità delle grandezze derivate sono espresse in termini di quelle fondamentali. I sistemi più utilizzati in Fisica sono il sistema SI e quello CGS, nei quali tempo, lunghezza e massa sono grandezze fondamentali. Nel vastissimo campo di studio della Fisica, tali grandezze spaziano su intervalli di valori molto ampi, e di conseguenza i metodi utilizzati per la loro misurazione sono molto vari: tutti concorrono a definire le grandezze stesse. Gli errori che si fanno nel misurare le grandezze fisiche sono classificati come sistematici o casuali. I primi possono essere eliminati, almeno in linea di principio; i secondi no, ma seguono leggi ben conosciute, per esempio la distribuzione normale (di Gauss). Gli errori che si commettono misurando alcune grandezze fisiche si propagano a quelle da esse ricavate con metodi di misurazione indiretti.

 ISBN 978-88-08-18215-9

1-1 Introduzione

Da tempo immemorabile l'uomo ha cercato di conoscere la Natura ($\varphi\upsilon\sigma\iota\sigma$, in greco), studiandone i fenomeni e tentando di interpretarli. La Fisica è dunque nata come *filosofia della Natura*, cioè come la disciplina che si proponeva di fornire una spiegazione di ogni tipo di fenomeno, con riguardo sia ai corpi animati sia a quelli inanimati, nell'ambito di una visione generale della Natura ispirata a considerazioni di tipo filosofico. Essa ha conservato tale caratteristica per lungo tempo, cristallizzandosi per diversi secoli (nel mondo occidentale) nella cosiddetta Fisica aristotelica. Le basi della Fisica moderna, intesa come *scienza*, furono poste nel XVII secolo da Galileo Galilei; fu allora che nacque il *metodo scientifico*, un modo nuovo di investigare la Natura che ancora oggi è alla base di tutte le discipline sperimentali. E con ciò la Fisica è diventata scienza fondamentale.

Tale ruolo di scienza fondamentale le deriva dalla sua generalità, che si manifesta nell'interesse alla comprensione degli aspetti più rilevanti della Natura, sulla base di un numero il più possibile limitato di concetti e principi fondamentali, e nel vastissimo campo di applicazioni, che spazia attualmente dalle proprietà e dal comportamento delle particelle subatomiche alla struttura e all'evoluzione dell'Universo.

Altre discipline nacquero e progredirono lungo strade diverse: ricordiamo qui, solo a titolo di esempio, la Biologia, la Geologia e l'Astronomia. Ma i loro cammini, più o meno recentemente, si sono tutti intrecciati in modo rilevante con quello della Fisica, con le sue scoperte e con il metodo di indagine che la caratterizza: sono nate allora la Biofisica, la Geofisica, l'Astrofisica, e così via. La stessa Chimica, sviluppatasi per tanto tempo in modo indipendente, utilizza oggi le leggi della Fisica moderna (Meccanica quantistica) per spiegare i processi di formazione e di trasformazione delle strutture atomiche e molecolari.

L'Ingegneria, che si occupa dello sviluppo di tecniche di progetto, della costruzione e del controllo di macchine e dispositivi i più svariati, poggia le proprie basi sulle leggi fondamentali della Fisica; e in alcune scoperte della Fisica moderna essa trova spesso stimoli fondamentali per la ricerca e lo sviluppo di applicazioni tecniche innovative. È naturale che si tratti, in realtà, di uno scambio proficuo che funziona nei due sensi: si pensi a quanto debba la Fisica sperimentale moderna alle realizzazioni della tecnica più avanzata. Per esempio nel campo delle particelle elementari – uno dei settori di punta della Fisica di oggi – si utilizzano correntemente apparati complessi e raffinati, che richiedono il contributo determinante di ingegneri e di tecnici, oltre che di fisici. Le grandi macchine acceleratrici, i rivelatori di particelle, i calcolatori che controllano istante per istante il funzionamento di decine di migliaia di elementi degli apparati, sono ormai ingredienti fondamentali di queste ricerche avanzate.

Infine, quanto sia importante e profondo il legame fra la Fisica e la Matematica verrà sottolineato ampiamente nel seguito: la Matematica è infatti il linguaggio della scienza.

1-2 Il metodo scientifico

L'osservazione dell'ambiente in cui viviamo ci dice che la Natura fornisce spontaneamente informazioni complesse, a volte confuse e perfino contraddittorie, dalle quali è difficile ricavare le leggi fondamentali che la governano. È merito di Galileo avere intuito la necessità di rivolgere alla Natura *domande* mirate, particolarmente semplici, che comportino a loro volta risposte semplici e (relativamente) oggettive.

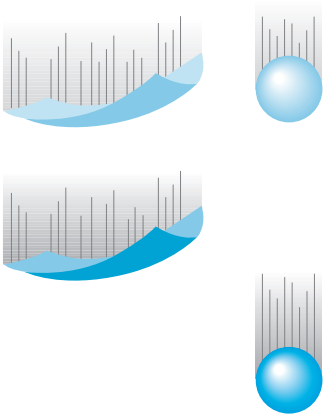


FIGURA 1-1
In aria una pallina di piombo arriva a terra prima di un foglio di carta.

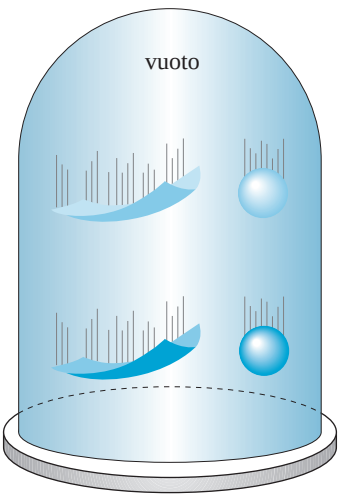


FIGURA 1-2
Nel vuoto una pallina di piombo e un foglio di carta arrivano a terra insieme.

Un esempio illuminante è quello della caduta dei corpi nelle vicinanze della superficie terrestre. L'esperienza insegna che, se lasciamo cadere contemporaneamente, dalla stessa altezza, un foglio di carta e una pallina di piombo, quest'ultima arriva a terra in un tempo molto minore (fig. 1-1). Potremmo dunque ricavarne una legge, secondo la quale i corpi più pesanti cadono verso terra più rapidamente di quelli leggeri. In realtà ci si accorge subito che la situazione è un po' più complicata. Basta appallottolare il foglio di carta e ripetere la prova: in questo caso i due oggetti arrivano a terra quasi insieme.

Oggi sappiamo che il moto di questi corpi verso terra dipende dalla presenza di due effetti concomitanti: l'attrazione gravitazionale della Terra, che provoca effettivamente la caduta, e una resistenza al moto dovuta all'aria. Se desideriamo separare le due azioni, si può costruire un contenitore al cui interno creare un vuoto abbastanza spinto, in modo che l'azione dell'aria venga fortemente ridotta (fig. 1-2). Provando di nuovo a far cadere i due corpi otterremmo il risultato sorprendente di vederli arrivare a terra insieme! Di conseguenza, se si considera il solo effetto di attrazione della Terra sui corpi, il risultato è completamente diverso da quanto ingenuamente supposto: in un dato luogo, tutti i corpi cadono allo stesso modo.

Il passo successivo potrebbe consistere nell'investigare con maggior dettaglio le conseguenze della presenza dell'aria. Possiamo ripetere la sperimentazione lasciando nel contenitore una piccola (nota) quantità di aria; e dopo provare ripetutamente, con densità d'aria sempre maggiori. Forse riusciremo a capire come avviene il moto, se e come esso dipende dalla densità dell'aria e dalla forma degli oggetti in caduta.

Abbiamo realizzato un esperimento!

L'aspetto centrale del ***metodo scientifico*** consiste proprio nell'eseguire esperimenti finalizzati, in funzione delle informazioni che si vogliono ottenere, cioè nel creare situazioni in cui la Natura è *costretta* a dare risposte semplici a domande semplici. In questo modo il ricercatore non è più passivo, ma in qualche modo stabilisce le regole del gioco.

Dunque, alla base del metodo scientifico sta l'*esperimento*. Il ricercatore, nell'ideazione degli esperimenti e nell'analisi dei loro risultati, si cimenta nell'individuare gli aspetti essenziali del fenomeno che lo interessa; schematizza i processi della Natura e ne costruisce ***modelli***, cioè una loro rappresentazione mentale in termini di schemi familiari. È un modello dell'atomo quello in cui si immagina che gli elettroni orbitino attorno al nucleo, così come fanno i pianeti attorno al Sole: un'esperienza visibile (macroscopica) suggerisce un analogo microscopico (non osservabile direttamente).

Può certo accadere che questi processi di schematizzazione risultino in pratica grossolani (o, addirittura, sbagliati); i risultati di esperimenti mirati suggeriranno le modifiche da apportare o l'esigenza di scegliere strade alternative.

Gli esperimenti si realizzano attraverso la misurazione di *grandezze fisiche*. Come sarà discusso in dettaglio più avanti, questo processo consiste in una serie di operazioni (*misurazione*) che hanno come risultato l'associazione di un numero (*misura*) a ciascuna grandezza; e, per ogni misura, la sua attendibilità, cioè quello che viene chiamato *errore*. Alla base di questo ruolo centrale delle misurazioni sta l'idea della *riproducibilità delle misure*: l'assunto è che, misurando più volte una grandezza nelle stesse condizioni sperimentali (ma non necessariamente con gli stessi strumenti), si debbano ottenere sempre risultati compatibili fra loro (cioè uguali nei limiti degli errori di misura).

Proprio al fine di rendere comprensibili e trasparenti i risultati della ricerca, la Fisica adotta il linguaggio della *Matematica*. Essa associa numeri ai fenomeni e rappresenta le relazioni fra le grandezze attraverso relazioni analitiche: la Matematica è lo strumento che rende *oggettiva*, per quanto possibile, la trasmissione delle informazioni.

 ISBN 978-88-08-18215-9

APPROFONDIMENTI

1-14 Misure di tempo

1-14-1 Il secondo

Come già discusso, il tempo è una delle grandezze fondamentali del sistema **SI**. Per ragioni facilmente intuibili, la sua unità di misura venne fissata inizialmente con riferimento alla durata del giorno. Il giorno è definito come l'intervallo di tempo che intercorre fra due successivi passaggi di una stella o del Sole nel punto più alto della sua traiettoria apparente nel cielo. Nel primo caso si parla di *giorno sidereo* (o siderale), nel secondo di *giorno solare*. Data la grande distanza delle stelle, la durata del giorno sidereo è costante nel corso dell'anno; ciò non accade per il giorno solare, poiché il moto della Terra attorno al Sole cambia nel corso dell'anno (cioè, di una rivoluzione completa attorno al Sole). Di conseguenza, se proprio si vuole utilizzare come periodo unitario il giorno solare, occorre almeno fare riferimento a un valore medio. Indicando con $t_1, t_2, \ldots, t_n$ le durate di giorni successivi, la durata del giorno solare medio sarebbe calcolabile come

$$\bar{t} = \frac{t_1 + t_2 + \ldots + t_n}{n} \equiv \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} t_i \,.$$

La relazione precedente è infatti la definizione di valor medio di una grandezza di cui sia noto un insieme di valori da essa assunti.

Il ***secondo*** (s) fu quindi definito come la durata di $\dfrac{1}{60 \cdot 60 \cdot 24} \equiv \dfrac{1}{86\,400}$ del giorno solare medio.

Con questa definizione dell'unità, il giorno sidereo risulta 86 164,09 s. Benché esso abbia l'importante caratteristica di avere durata costante nel corso dell'anno, pur tuttavia non si presta ad essere prescelto come durata di riferimento. Misurando le giornate in giorni siderei, il Sole non conserverebbe l'importante caratteristica di sorgere e tramontare più o meno agli stessi orari. Scegliendo come unità di tempo un sottomultiplo del giorno solare medio, si utilizza come fenomeno periodico di riferimento il moto della Terra attorno al proprio asse, che era ritenuto stabile nel tempo. Come per l'unità di lunghezza (il metro), anche per il secondo si viene a stabilire un collegamento con una caratteristica del nostro pianeta. In realtà, la durata della rotazione terrestre è soggetta a variazioni di diverso genere, sia periodiche (legate alle stagioni) sia di lungo periodo (la Terra ruota sempre più lentamente). Di conseguenza, il procedimento adottato per definire il secondo non può essere solo quello di calcolare il valor medio del giorno solare su un anno, ma richiede anche la scelta di *un particolare anno*. Così il secondo venne definito imponendo che la durata dell'anno solare nel 1900 fosse di 31 556 925,974 7 secondi. L'anno solare (o tropico) corrisponde all'intervallo di tempo compreso fra due equinozi di primavera.

Definito il secondo, si rende necessario disporre di sistemi in grado di contare i secondi. Questa operazione è garantita dagli orologi, i quali svolgono la funzione di registrare il trascorrere del tempo. Limitandosi a orologi di precisione, possiamo disporre essenzialmente di tre tipi di orologi: quelli basati sul pendolo, gli orologi al quarzo e quelli al cesio. I primi utilizzano la proprietà, che stiamo qui enunciando in modo assai semplificato, che un pendolo di lunghezza costante oscilla con un determinato periodo. Se le variazioni di temperatura vengono opportunamente compensate, orologi di precisione a pendolo possono commettere errori di 0,5 ms in 24 ore, cioè di 1 s in alcuni anni di funzionamento. Il campione teorico dell'unità di tempo è il pendolo che batte il secondo. Gli orologi al quarzo si basano sulla proprietà del quarzo di generare segnali elettrici caratterizzati da una notevole stabilità in frequenza. Contando gli impulsi emessi dal sistema e conoscendo la frequenza, cioè il numero di impulsi emessi nell'unità di tempo, è

Esempio 1-3

Un comando militare utilizza tre microfoni allineati A, B e C, disposti alla distanza L l'uno dall'altro, per localizzare la posizione dell'artiglieria nemica. Il colpo sparato da un cannone avversario viene ricevuto per primo dal microfono centrale B e, successivamente, con lo stesso ritardo Δt, dai due microfoni A e C. Indicata con x la distanza da B del cannone nemico, e supponendo che sia $x \gg L$, trovare un'espressione approssimata della distanza x, in funzione della velocità v del suono e del ritardo Δt.

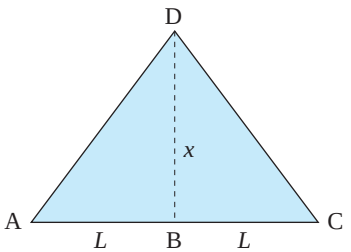


FIGURA 1-12
Situazione geometrica dell'esempio 1-3.

La figura 1-12 rappresenta uno schema della situazione. Dato che il ritardo Δt è lo stesso per i due microfoni in A e C, il punto D, che indica la posizione della batteria nemica, deve trovarsi sulla retta passante per B e perpendicolare ad AC. La differenza di percorso fra i due segnali sonori da D a C e da D a B è data da:

$$\Delta d = \sqrt{x^2 + L^2} - x\,.$$

Essendo (per ipotesi) $x \gg L$, si può approssimare la radice quadrata con uno sviluppo polinomiale (vedi l'app. A-5):

$$\sqrt{x^2 + L^2} = x\sqrt{1 + \frac{L^2}{x^2}} \approx x\left(1 + \frac{L^2}{2x^2}\right) \Rightarrow \Delta d \approx \frac{L^2}{2x}\,.$$

Di conseguenza, essendo $\Delta d = v\Delta t$, si ha: $v\Delta t \approx \dfrac{L^2}{2x} \Rightarrow x \approx \dfrac{L^2}{2v\Delta t}$.

1-15-4 Metodi per distanze astronomiche

Quando si deve misurare la distanza dalla Terra di una stella non troppo lontana, si utilizza un metodo detto della *parallasse annua* (basato sulla triangolazione). Esso permette misurazioni con precisioni $\sim$ 10% fino a distanze non superiori a circa 70 *anni luce* (un *anno luce* è la distanza percorsa dalla luce nel vuoto in un anno, pari a $9{,}46 \cdot 10^{15}$ m).

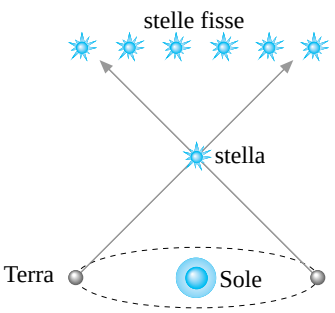


FIGURA 1-13
Schema semplificato della parallasse annua.

Le misurazioni sfruttano il fatto che, man mano che la Terra si muove attorno al Sole, la posizione (vista dalla Terra) di una stella relativamente vicina cambia rispetto alle stelle cosiddette fisse (che sono molto lontane). Come mostrato in figura 1-13, a distanza di sei mesi la congiungente (Terra-stella vicina) ha direzioni diverse rispetto alle stelle fisse: dato che conosciamo la distanza Terra-Sole, questo permette di ricavare la distanza della stella da noi, con semplici considerazioni geometriche.

Guardando la figura s'intuisce che, quando la distanza della stella diventa troppo grande, l'effetto angolare è molto piccolo e la precisione delle misure decresce rapidamente. In questi casi si utilizzano generalmente metodi che, anziché impiegare la geometria, sfruttano la luminosità delle stelle, attraverso la misurazione di una grandezza chiamata *magnitudine apparente*. Tali metodi richiedono che si riesca a misurare anche la cosiddetta *magnitudine assoluta*, il che può essere realizzato attraverso il *metodo delle Cefeidi*, che serve per determinare le distanze di galassie lontanissime, per le quali il sistema della triangolazione si dimostra inefficiente.

Le Cefeidi sono particolari stelle caratterizzate da un'emissione luminosa variabile nel tempo. Tale fenomeno avviene perché il raggio della stella varia nel tempo, per effetto dell'azione combinata di forze di pressione (che tendono a dilatarla) e di forze gravitazionali (che la comprimono). La variazione periodica del raggio provoca una variazione della superficie che irraggia e, di conseguenza, della luminosità. Ciò consente di ottenere una relazione tra il periodo temporale con cui

COMPLEMENTI

1-16 Legge del decadimento

Il fenomeno della radioattività fu scoperto nel 1896 da Henry Becquerel. Esso consiste nella proprietà di alcune sostanze di trasformarsi (a volte spontaneamente, a volte no), emettendo particelle caratteristiche. Queste trasformazioni riguardano il *nucleo* dell'atomo e hanno un andamento comune. Un possibile esempio è quello dell'uranio (progenitore o nucleo padre) che si trasforma in torio (discendente o nucleo figlio), secondo la reazione:

$$^{238}\mathrm{U} \rightarrow {}^{234}\mathrm{Th} + \alpha\,,$$

nella quale viene emessa una particella α (nucleo di ^{4}He). Il processo consiste in una fissione (cioè una rottura) del nucleo originario (composto di 238 nucleoni) in due nuclei: uno di 234 e l'altro di 4 nucleoni.

Se in un certo istante iniziale si dispone di una certa quantità del progenitore (N_0 nuclei), col passare del tempo, regolarmente, alcuni nuclei vanno trasformandosi. Non c'è modo di sapere ***quali*** nuclei subiranno il decadimento, ma si conosce con grande precisione ***quanti*** nuclei decadranno al passare del tempo. Il numero di nuclei ancora sopravvissuti, dopo un tempo t dall'istante iniziale, è rappresentato dalla relazione:

$$\boxed{N(t) = N_0 \mathrm{e}^{-t/\tau}}\,. \qquad (1\text{-}3)$$

Questa equazione è chiamata *legge del decadimento radioattivo* e la grandezza τ è detta ***vita media*** del progenitore (il numero irrazionale «e», che vale circa 2,718, rappresenta la base dei logaritmi naturali o neperiani). La vita media è proporzionale a quello che abbiamo chiamato tempo di dimezzamento:

$$\tau = \frac{\tau_{\frac{1}{2}}}{\ln 2}\,.$$

Evidentemente, τ (come $\tau_{\frac{1}{2}}$) fissa la rapidità con cui avviene il decadimento. Si calcola facilmente il numero di nuclei ancora presenti dopo un tempo $\tau_{\frac{1}{2}}$:

$$N(\tau_{\frac{1}{2}}) = N_0 \mathrm{e}^{-\frac{\tau_{\frac{1}{2}}}{\tau}} = N_0 \mathrm{e}^{-\ln 2} = \frac{N_0}{2}\,.$$

Dopo una vita media, invece, il numero di nuclei sopravvissuti è ridotto di un fattore e^{-1}; dopo tre vite medie solo una frazione pari a $\mathrm{e}^{-3} \approx 5\%$ dei nuclei originari non è ancora decaduta (fig. 1-15). Ai fini delle misurazioni di tempi, la relazione (1-3) viene ovviamente invertita:

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\frac{t}{\tau} \Rightarrow t = \tau \ln \frac{N_0}{N}\,.$$

Conoscendo τ, N_0 e N si ricava il tempo trascorso. Se l'espressione (1-3) rappresenta il numero di nuclei ancora sopravvissuti dopo un tempo t, a partire da un qualsiasi istante iniziale in cui ve n'erano N_0, allora il numero di quelli decaduti nello stesso intervallo di tempo è

$$m = N_0 - N(t) = N_0(1 - \mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}}) \approx N_0\left[1 - \left(1 - \frac{t}{\tau}\right)\right] = N_0 \frac{t}{\tau}\,,$$

nella quale è stato utilizzato lo sviluppo in serie di Taylor del termine esponenziale, arrestato al primo ordine, valido se $t \ll \tau$ (vedi l'app. A-5). Il rapporto fra m e N_0 rappresenta dunque la probabilità di decadimento di un qualsiasi nucleo, nell'intervallo di tempo t; nelle approssimazioni fatte, essa vale $P(t) = t/\tau$.

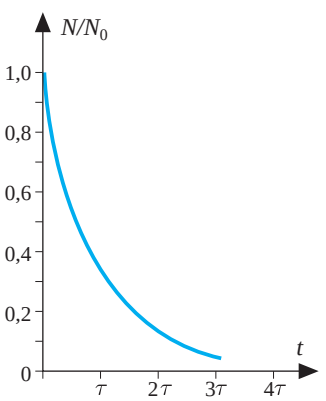


FIGURA 1-15
Rappresentazione grafica della legge del decadimento radioattivo. τ rappresenta la vita media della specie radioattiva considerata.

 ISBN 978-88-08-18215-9

Problemi

1-1.
La distanza tra polo Nord ed equatore è, per la definizione storica di metro, pari a 10 000 km (10 milioni di metri); assumendo che la forma della Terra si possa approssimare a una sfera perfetta, determinarne il raggio.

1-2.
Determinare, approssimativamente, quanti secondi ci sono in un anno solare, tenendo conto che un anno su quattro è bisestile.

1-3.
La figura sotto a sinistra mostra un tipico limite di velocità per i mezzi a motore in zone urbane. Benché non indicato, è da intendersi espresso in km/h. 1) A quanti metri al secondo corrisponde? 2) Se fosse da intendersi in m/s, quale limite sarebbe in km/h?

FIGURA E1-1
Limiti di velocità sulla strada in diversi paesi: strade europee a sinistra, strade statunitensi a destra. Qual è il limite più alto?

1-4.
Un tipico limite di velocità sulle strade statali americane è di 45 mph, cioè di 45 miglia all'ora (vedi figura sopra a destra). Sapendo che un miglio vale 1609 m, trovare il valore di velocità massima 1) in km/h e 2) in m/s.

1-5.
Uno studente compra una risma di fogli A4, sulla cui confezione è indicata la densità della carta $\sigma = 80$ g/m^2. Sapendo che la risma ha 500 fogli, di dimensioni 210 mm $\cdot$ 297 mm, determinare la massa della risma.

1-6.
Un triangolo isoscele ha i lati uguali lunghi $L = 30$ cm e la base lunga $b = 5$ cm; l'angolo tra i due lati uguali è calcolabile in prima approssimazione come $\theta_a = b/L$. Determinare l'angolo approssimato θ_a, l'angolo esatto θ_v e calcolare l'errore relativo ε_r commesso nell'approssimazione.

1-7.
Uno studente vuole misurare l'accelerazione di gravità ed esegue un semplice esperimento. Lascia cadere da un'altezza $h = 2$m una biglia, misurandone il tempo che questa impiega per arrivare a terra. Ripete l'esperimento $N = 5$ volte, trovando i valori: $t_1 = 0{,}64$ s, $t_2 = 0{,}68$ s, $t_3 = 0{,}62$ s, $t_4 = 0{,}63$ s e $t_5 = 0{,}65$ s. 1) Calcolare la media $\overline{t}$ dei tempi, l'errore quadratico medio ε, l'errore $\overline{\varepsilon}$ sulla media. 2) Sapendo che la relazione tra altezza e tempi è $h = \frac{g}{2}t^2$, trovare la migliore stima per g, trascurando l'incertezza su h.

1-8.
La velocità di fuga v_F da un pianeta è la velocità minima che deve avere un corpo per vincere definitivamente l'attrazione gravitazionale del pianeta. Sapendo che v_F dipende solo dal raggio del pianeta R e dall'accelerazione di gravità g al livello della superficie, determinare, mediante l'analisi dimensionale, quale tra le seguenti formule è accettabile:

$$a)\ v_F = 4gR \qquad b)\ v_F = \sqrt{3g/R}$$

$$c)\ v_F = \sqrt{2gR} \qquad d)\ v_F = 2(gR)^2$$

e applicarla per trovare il valore di v_F per il pianeta Terra, sapendo che $g \approx 9{,}8$ m/s^2.

1-9.
L'accelerazione di gravità g ($\approx 9{,}8$ m/s^2) dipende principalmente dalla forza di gravità, ma ha anche un piccolo contributo Δg dovuto al fatto che la Terra (di raggio R) ruota su se stessa ogni $T \approx 24$ h. Determinare quali tra le seguenti formule

$$a)\ \Delta g = \frac{2\pi R}{T} \qquad b)\ \Delta g = \frac{4\pi^2 R}{T^2}$$

$$c)\ \Delta g = \frac{2\pi}{TR} \qquad d)\ \Delta g = \frac{2\pi R^2}{T}$$

può descrivere il contributo Δg per un corpo posto all'equatore.

1-10.
Un paracadutista di massa $M = 80$ kg si lancia in caduta libera da un aereo e, a causa del frenamento dell'aria, dopo una fase iniziale, raggiunge una velocità di caduta costante. Tale frenamento dipende da un parametro β, a sua volta funzione della forma del corpo in caduta, che nel caso in esame vale $\beta_c = 12$ kg/s quando il paracadute è chiuso e $\beta_a = 70$ kg/s quando il paracadute è aperto. Indicando con g l'accelerazione di gravità, determinare quale delle seguenti formule

$$a)\ v = Mg\beta \qquad b)\ v = \frac{g\beta}{M}$$

$$c)\ v = \frac{\beta M}{g} \qquad d)\ v = \frac{Mg}{\beta}$$

può essere usata per calcolare la velocità di caduta. Trovare le velocità nel caso di paracadute chiuso e di paracadute aperto assumendo $g = 9{,}8$ m/s^2.

1-11.
Uno studente lascia rotolare su un piano inclinato un anello di massa m e raggio R. Inizialmente l'anello è sistemato in verticale ed è fermo. Si vuole determinare la velocità dell'anello al termine del piano inclinato, quando è sceso di una quota h. Lo studente, non ricordandosi la formula corretta, prova a scrivere queste quattro formule, tutte dipendenti dall'accelerazione di gravità g:

$$a)\ v = \sqrt{gh} \qquad b)\ v = \sqrt{gR}$$

$$c)\ v = R\sqrt{g/h} \qquad d)\ v = h\sqrt{g/R}$$

Quale di queste ha una qualche probabilità di essere giusta? Quale previsione si può fare per la velocità finale nel caso di $R = 2$ cm, $h = 30$ cm, e $g = 9{,}8$ m/s^2?
Suggerimento: esaminare dal punto di vista fisico le previsioni fornite dalle diverse formule per valori estremi (molto piccoli o molto grandi) delle lunghezze R e h. Cosa ci suggerisce l'esperienza quotidiana per la dipendenza di v dall'altezza h? E per la dipendenza da R?

Risultati

1-1 R. $R_{\text{Terra}} = 6366$ km.

1-2 R. $T = 31557600$ s $\approx 31{,}6$ Ms $\approx \pi \times 10^7$ s.

1-3 R. 1) 13,9 m/s; 2) 180 km/h.

1-4 R. 1) 72,4 km/h; 2) 20,1 m/s.

1-5 R. $M = 2{,}49$ kg.

1-6 R. $\theta_a = 0{,}16666\ldots$ rad; $\theta_v = 0{,}16686\ldots$ rad; $\varepsilon_r = |\theta_a - \theta_v|/\theta_v = 0{,}001$.

1-7 R. 1) $\bar{t} = 0{,}644$ s, $\varepsilon = 0{,}023$ s, $\bar{\varepsilon} = 0{,}010$ s; 2) $g = (9{,}64 \pm 0{,}30)$ m/s^2.

1-8 R. Solo la *c*) ha le dimensioni corrette; $v_F = 11{,}2$ km/s.

1-9 R. Solo la *b*) ha le dimensioni corrette; $\Delta g = 0{,}0337$ m/s^2.

1-10 R. Solo la *d*) ha le dimensioni corrette; $v_c = 235$ km/h; $v_a = 40{,}3$ km/h.

1-11 R. Tutte le formule sono dimensionalmente corrette, ma l'unica fisicamente accettabile è la *a*), che fornisce $v = \sqrt{gh} = 1{,}71$ m/s.

RIEPILOGO DI ALCUNE RELAZIONI SIGNIFICATIVE

$[\mathrm{L}^\alpha \mathrm{M}^\beta \mathrm{T}^\gamma]$	dimensione di una grandezza fisica
$(\bar{v} \pm \bar{\varepsilon})$ (seguito dall'unità di misura)	risultato di più misurazioni
$\bar{v} = \dfrac{v_1 + v_2 + \ldots + v_N}{N} \equiv \dfrac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} v_i$	valore medio di N misure
$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\dfrac{1}{N(N-1)}\sum_{i=1}^{N}(v_i - \bar{v})^2}$	errore standard di N misure
$N(t) = N_0 \mathrm{e}^{-t/\tau}$	legge del decadimento radioattivo
$f(x) = A\mathrm{e}^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\varepsilon^2}}$	distribuzione di Gauss
$P_m(n) = \mathrm{e}^{-m}\dfrac{m^n}{n!}$	distribuzione di Poisson
$\varepsilon_a^2 = \left(\dfrac{\partial f}{\partial x}\right)^2 \varepsilon_x^2 + \left(\dfrac{\partial f}{\partial y}\right)^2 \varepsilon_y^2 + \left(\dfrac{\partial f}{\partial z}\right)^2 \varepsilon_z^2 + \ldots$	propagazione degli errori

S. FOCARDI
I. MASSA
A. UGUZZONI
M. VILLA

FISICA GENERALE

Meccanica e Termodinamica

Gli argomenti trattati in questo libro sono quelli tradizionali di Meccanica e Termodinamica insegnati nei corsi di Fisica delle Scuole di Scienze, Ingegneria e Architettura. Tali argomenti vengono trattati tenendo conto delle più attuali conoscenze della Fisica e dei più recenti risultati sperimentali, tra quelli di rilievo per un corso di carattere generale. Uno degli aspetti più importanti della Fisica, che ne condiziona e ne qualifica l'insegnamento, è la capacità di far acquisire il metodo di indagine scientifica della realtà. Tale aspetto è molto curato nel libro, anche attraverso una mirata distribuzione degli argomenti di ciascun capitolo su tre livelli: un corpo centrale fondamentale, una parte dedicata agli approfondimenti e una terza riservata ai complementi.
Tutti i capitoli contengono numerosi esempi svolti (più di 300, in totale) dettagliatamente discussi e risolti. In questa nuova edizione, inoltre, al termine di ogni capitolo sono stati inseriti problemi da svolgere (oltre 300), per i quali sono forniti la formula risolutiva finale e il risultato numerico. Esempi e problemi sono proposti a vari livelli di difficoltà: in tal modo costituiscono un banco di prova immediato per la verifica del livello di apprendimento raggiunto, un'occasione per un consolidamento delle conoscenze e una fonte di idee per possibili ulteriori sviluppi. All'inizio di ciascun capitolo si trova un compendio che presenta in forma concisa la sequenza degli argomenti che verranno trattati; alla fine, invece, si trova un estratto delle relazioni ritenute più significative.
Nel corso di tutto il volume è costante l'impegno a mantenere almeno due riferimenti fondamentali: il fatto che la Fisica abbia la sua forza nella capacità di realizzare modelli fondati della realtà e il suo carattere di scienza sperimentale, che insieme la rendono sorgente di innumerevoli applicazioni pratiche.