Andrea Alessandrini

Fisica
per le scienze della vita

cea
casa editrice ambrosiana

Andrea Alessandrini

Fisica
per le scienze della vita

Se vuoi accedere alle risorse online riservate

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

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

PER LO SMARTPHONE

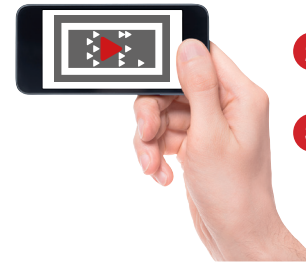
GUARDA! i video del libro sul tuo smartphone

SCARICA LA APP ZANICHELLI Guarda! **DA:**

Scarica su App Store

DISPONIBILE SU Google Play

1. Sul libro, inquadra l'icona



2. Sullo smartphone, tocca le icone
3. Guarda i video e le altre risorse digitali

© 2023 CEA – Casa Editrice Ambrosiana, viale Romagna 5, 20089 Rozzano (MI) [92045]
CEA – Casa Editrice Ambrosiana è un marchio editoriale di Zanichelli editore S.p.A.

Diritti riservati
I diritti di pubblicazione, riproduzione, comunicazione, distribuzione, trascrizione, traduzione, noleggio, prestito, esecuzione, elaborazione in qualsiasi forma o opera, di memorizzazione anche digitale e di adattamento totale o parziale su supporti di qualsiasi tipo e con qualsiasi mezzo (comprese le copie digitali e fotostatiche), sono riservati per tutti i paesi. L'acquisto della presente copia dell'opera non implica il trasferimento dei suddetti diritti né li esaurisce.

Fotocopie e permessi di riproduzione
Le fotocopie per uso personale (cioè privato e individuale, con esclusione quindi di strumenti di uso collettivo) possono essere effettuate, nei limiti del 15% di ciascun volume, dietro pagamento alla S.I.A.E. del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Tali fotocopie possono essere effettuate negli esercizi commerciali convenzionati S.I.A.E. o con altre modalità indicate da S.I.A.E.

Per le riproduzioni ad uso non personale (ad esempio: professionale, economico, commerciale, strumenti di studio collettivi, come dispense e simili) l'editore potrà concedere a pagamento l'autorizzazione a riprodurre un numero di pagine non superiore al 15% delle pagine del presente volume.

Le richieste vanno inoltrate a:
Centro Licenze e Autorizzazioni per le Riproduzioni Editoriali (CLEARedi),
Corso di Porta Romana 108, 20122 Milano
e-mail: **autorizzazioni@clearedi.org** e sito web: **www.clearedi.org**

L'autorizzazione non è concessa per un limitato numero di opere di carattere didattico riprodotte nell'elenco che si trova all'indirizzo **www.zanichelli.it/chi-siamo/fotocopie-e-permessi**

L'editore, per quanto di propria spettanza, considera rare le opere fuori del proprio catalogo editoriale. La loro fotocopia per i soli esemplari esistenti nelle biblioteche è consentita, anche oltre il limite del 15%, non essendo concorrenziale all'opera. Non possono considerarsi rare le opere di cui esiste, nel catalogo dell'editore, una successiva edizione, né le opere presenti in cataloghi di altri editori o le opere antologiche.
Nei contratti di cessione è esclusa, per biblioteche, istituti di istruzione, musei e archivi, la facoltà di cui all'art. 71-ter legge diritto d'autore.
Per permessi di riproduzione, diversi dalle fotocopie, rivolgersi a **segreteria_cea@ceaedizioni.it**

Licenze per riassunto, citazione e riproduzione parziale a uso didattico con mezzi digitali
La citazione, la riproduzione e il riassunto, se fatti con mezzi digitali, sono consentiti (art. 70 bis legge sul diritto d'autore), limitatamente a brani o parti di opera, a) esclusivamente per finalità illustrative a uso didattico, nei limiti di quanto giustificato dallo scopo non commerciale perseguito. (La finalità illustrativa si consegue con esempi, chiarimenti, commenti, spiegazioni, domande, nel corso di una lezione); b) sotto la responsabilità di un istituto di istruzione, nei suoi locali o in altro luogo o in un ambiente elettronico sicuro, accessibili solo al personale docente di tale istituto e agli alunni o studenti iscritti al corso di studi in cui le parti di opere sono utilizzate; c) a condizione che, per i materiali educativi, non siano disponibili sul mercato licenze volontarie che autorizzano tali usi.
Zanichelli offre al mercato due tipi di licenze di durata limitata all'anno accademico in cui le licenze sono concesse:
A) licenze gratuite per la riproduzione, citazione o riassunto di una parte di opera non superiore al 5%. Non è consentito superare tale limite del 5% attraverso una pluralità di licenze gratuite,
B) licenze a pagamento per la riproduzione, citazione, riassunto parziale ma superiore al 5% e comunque inferiore al 40% dell'opera.
Per usufruire di tali licenze occorre seguire le istruzioni su **www.zanichelli.it/licenzeeducative**
L'autorizzazione è strettamente riservata all'istituto educativo licenziatario e non è trasferibile in alcun modo e a qualsiasi titolo.

Garanzie relative alle risorse digitali
Le risorse digitali di questo volume sono riservate a chi acquista un volume nuovo: vedi anche al sito **www.zanichelli.it/contatti/acquisti-e-recesso** le voci *Informazioni generali su risorse collegate a libri cartacei* e *Risorse digitali e libri non nuovi*.
Zanichelli garantisce direttamente all'acquirente la piena funzionalità di tali risorse.
In caso di malfunzionamento rivolgersi a **assistenza@zanichelli.it**
La garanzia di aggiornamento è limitata alla correzione degli errori e all'eliminazione di malfunzionamenti presenti al momento della creazione dell'opera.
Zanichelli garantisce inoltre che le risorse digitali di questo volume sotto il suo controllo saranno accessibili, a partire dall'acquisto, per tutta la durata della normale utilizzazione didattica dell'opera. Passato questo periodo, alcune o tutte le risorse potrebbero non essere più accessibili o disponibili: per maggiori informazioni, leggi **my.zanichelli.it/fuoricatalogo**

Soluzioni degli esercizi e altri svolgimenti di compiti assegnati
Le soluzioni degli esercizi, compresi i passaggi che portano ai risultati e gli altri svolgimenti di compiti assegnati, sono tutelate dalla legge sul diritto d'autore in quanto elaborazioni di esercizi a loro volta considerati opere creative tutelate, e pertanto non possono essere diffuse, comunicate a terzi e/o utilizzate economicamente, se non a fini esclusivi di attività didattica.

Diritto di TDM
L'estrazione di dati da questa opera o da parti di essa e le attività connesse non sono consentite, salvi i casi di utilizzazioni libere ammessi dalla legge. L'editore può concedere una licenza. La richiesta va indirizzata a **tdm@zanichelli.it**

Realizzazione editoriale: Epitesto, Milano
Disegni: Giuseppe Maserati

Copertina:
- *progetto grafico*: Anchora, Milano
- *realizzazione*: Sara Travella/GALLINE A POIS, Milano
- *immagine di copertina*: © MandyDisher/Getty Images

Prima edizione: aprile 2023

Ristampa: **prima tiratura**

5 4 3 2 1 2023 2024 2025 2026 2027

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

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

Stampa:

per conto di Zanichelli editore S.p.A.
Via Irnerio 34, 40126 Bologna

Indice generale

In colore azzurro sono evidenziate le risorse online raggiungibili con l'applicazione **GUARDA!** o visitando il sito del libro. La pagina indicata riporta il marker per accedere tramite smartphone.

Prefazione: la fisica e la biologia XVII

Capitolo 1

Gli strumenti matematici per la fisica 1

1.1 Che rapporto esiste tra fisica e matematica? E tra matematica e biologia? 2
Nota storica – Storia del concetto di legge matematica 3

1.1.1 La matematica e la descrizione del mondo naturale 4

1.2 I sistemi di unità di misura: una breve storia 6

1.2.1 L'unità di misura della lunghezza 10
1.2.2 L'unità di misura della massa 10
1.2.3 L'unità di misura del tempo 11
1.2.4 L'unità di misura della temperatura 11
1.2.5 L'unità di misura della corrente elettrica 11
1.2.6 L'unità di misura dell'intensità luminosa 12
1.2.7 L'unità di misura della quantità di sostanza 12
Esempio 1.1 La scala delle dimensioni in biologia 12
Nota storica – Eratostene e la misura del meridiano terrestre 13

1.3 Il controllo dimensionale 13
Esempio 1.2 La forza di trascinamento in un fluido 15 – Esempio 1.3 La velocità del suono in un gas 16

1.4 I vettori e i sistemi di riferimento 17

1.4.1 La somma di vettori 17
1.4.2 La moltiplicazione di un vettore per uno scalare 18
1.4.3 I sistemi di riferimento 18
Esempio 1.4 Dalle coordinate polari alle coordinate cartesiane in due dimensioni 20 – Esempio 1.5 Equazioni in coordinate cartesiane e polari 21
1.4.4 Il prodotto scalare tra due vettori 21
1.4.5 Il prodotto vettoriale tra due vettori 22
1.4.6 Le componenti di un vettore 23
1.4.7 La geometria e la fisica 26
Esempio 1.6 Le rotazioni possono essere considerate dei vettori? 28

1.5 Il radiante e la trigonometria 29

1.6 Il calcolo: la derivata e l'integrale 31
Esempio 1.7 Dall'accelerazione alla velocità e allo spazio percorso 35 – Esempio 1.8 La forza di gravità e la forza elettrica 37

1.6.1 Le derivate parziali 38

1.7 Funzioni esponenziale e logaritmica 40

1.8 Cenni per la risoluzione di equazioni differenziali 42
Esempio 1.9 La derivazione della legge di Lambert-Beer per l'assorbimento della luce da parte di un materiale 45

1.9 Lo sviluppo in serie di Taylor 46
Esempio 1.10 L'equazione del moto per un pendolo semplice 47

Esercizi svolti, bibliografia e sitografia del capitolo

Capitolo 2

La meccanica 49

2.1 L'importanza della meccanica 50

2.2 La descrizione del moto 51

2.2.1 Il concetto di punto materiale 51
2.2.2 La velocità 52
Nota storica – I quattro argomenti di Zenone contro il movimento e alcune considerazioni sul dualismo pensiero/realtà 54
Esempio 2.1 La velocità istantanea di una reazione chimica 56

2.2.3 L'accelerazione 56

2.3 Il moto in due dimensioni 57

2.4 Alcuni caratteristici tipi di moto 59

2.4.1 Il moto rettilineo uniforme 59
2.4.2 Il moto rettilineo con accelerazione costante 60
2.4.3 L'interpretazione geometrica dello spazio percorso nel diagramma velocità in funzione del tempo 62
Esempio 2.2 L'incrocio tra due ciclisti 63 – Esempio 2.3 Un sasso cade in un pozzo 63 – Esempio 2.4 Una moto che accelera 63 – Esempio 2.5 Accelerazione e decelerazione 65 – Esempio 2.6 Il tempo di frenata 66 – Esempio 2.7 Un inseguimento in automobile 66 – Esempio 2.8 Un'automobile in frenata 67 – Esempio 2.9 Una corsa per prendere l'autobus 67

2.5 Il moto circolare uniforme 67
Esempio 2.10 Il moto circolare di una ruota 71 – Esempio 2.11 Le lancette dell'orologio si muovono di moto circolare uniforme 72

2.6 Il moto armonico 72
Esempio 2.12 Un oscillatore armonico 74

2.7 Velocità caratteristiche in biologia 74

2.7.1 La velocità dei motori molecolari 75
2.7.2 La velocità dei segnali nervosi 76
2.7.3 La velocità di movimento di una cellula 77

2.8 Una visione d'insieme dei principi del moto di Newton 79
Nota storica – Newton e i Principia *81*

2.9 I principi del moto di Newton 82

2.9.1 Il primo principio del moto di Newton 83
2.9.2 Il secondo principio del moto di Newton 84
2.9.3 Il terzo principio del moto di Newton 90

2.10 Quantità di moto e sua conservazione 91
Nota storica – La quantità di moto 93
Esempio 2.13 La medusa e la conservazione della quantità di moto 93

2.11 La legge di gravitazione universale 94

2.12 Massa inerziale e massa gravitazionale 97

2.13 La forza elettrica 99

2.14 Il concetto di campo di forza e forza a distanza 100

2.15 I principi del moto di Newton applicati a semplici casi 102

© 978-88-08-92045-4

2.15.1 Il piano inclinato 102
Nota storica – L'esperimento del piano inclinato di Galilei 103
Esempio 2.14 Una carrucola e un piano inclinato 104

2.15.2 La macchina di Atwood 106
2.15.3 Il moto dei proiettili 107
Esempio 2.15 Il moto parabolico con inizio e fine su piani diversi 110 – Esempio 2.16 Il moto di un oggetto lasciato cadere da un aereo 111

2.15.4 Il moto di un oggetto su una traiettoria circolare 112
Esempio 2.17 Il moto circolare su un piano verticale 112 – Esempio 2.18 Sollevamento di una sfera che ruota 113

2.15.5 Il pendolo semplice 113
Esempio 2.19 La misura di g con il pendolo 115 – Esempio 2.20 Il pendolo conico 115

2.16 Le forze apparenti 116
Nota storica – Galileo Galilei e la sua eredità 117
Esempio 2.21 In una carrozza di un treno che frena 120 – Esempio 2.22 Un pendolo in un ascensore 121

2.17 Il pendolo di Foucault 122
2.18 La forza di Coriolis 122
Esercizi svolti, bibliografia e sitografia del capitolo

Capitolo 3
La forza elastica e l'attrito 123

3.1 *Ut tensio sic vis*: la forza elastica 124
Nota storica – L'instancabile Robert Hooke e la nascita della teoria cellulare 126
Esempio 3.1 Una molla in verticale 129 – Esempio 3.2 L'equilibrio di una molla su un piano inclinato 130 – Esempio 3.3 La frequenza di oscillazione di due masse poste alle estremità opposte di una molla 131 – Esempio 3.4 Il moto armonico di una molla 132 – Esempio 3.5 Come calcolare la costante elastica di una molla 133

3.2 Molle in serie e molle in parallelo 135
Esempio 3.6 Due molle collegate in parallelo 135 – Esempio 3.7 Due molle collegate in parallelo 135

3.3 La molla come modello per i sistemi biologici 135
3.4 Le forze di attrito 137
3.4.1 Attrito statico e attrito dinamico 138
Esempio 3.8 Una cassa sul pianale di un furgone che parte 139 – Esempio 3.9 Il piano inclinato con attrito 141 – Esempio 3.10 Un blocco in salita su un piano inclinato con attrito 143 – Esempio 3.11 La carrucola sul piano inclinato 144 – Esempio 3.12 Un'automobile in curva 145
3.4.2 L'attrito di rotolamento 146

3.5 Moto in presenza di forze resistenti 146
Esempio 3.13 Lo spazio di arresto di un corpo rallentato da una forza direttamente proporzionale alla velocità 148 – Esempio 3.14 La distanza percorsa da un oggetto in caduta libera e sottoposto a una forza resistente 149

3.6 La meccanobiologia e la produzione di forze all'interno della cellula 152
3.6.1 La fisica dei legami *catch-bonds* 155
Esercizi svolti, bibliografia e sitografia del capitolo

Capitolo 4
Lavoro ed energia 157

4.1 Un'introduzione al concetto di energia 158
4.2 Il lavoro di una forza 161
Esempio 4.1 Una scatola in un ascensore 164

4.3 L'energia cinetica 164
4.4 La potenza 166
Nota storica – IL teorema delle forze vive 166
4.4.1 La potenza dei nostri muscoli 167
Esempio 4.2 La potenza prodotta da un muscolo 168

4.5 L'energia potenziale 170
Esempio 4.3 Il lavoro della forza peso è indipendente dal percorso da una posizione iniziale a una posizione finale 171

4.6 Le forze conservative 172
Esempio 4.4 La conservazione dell'energia meccanica 173 – Esempio 4.5 Una massa fermata da una molla 174

4.7 La relazione tra energia potenziale e forza 176
4.8 La relazione tra le superfici con energia potenziale costante e la forza corrispondente 177
4.9 Diagrammi di energia e posizioni di equilibrio 178
4.9.1 L'approssimazione della curva di energia potenziale in prossimità di un minimo 179

4.10 L'energia potenziale associata alla forza gravitazionale e alla forza elettrica 180
Esempio 4.6 Un satellite in orbita attorno alla Terra 181 – Esempio 4.7 Una massa agganciata a una molla in un campo gravitazionale 181

4.11 Le reazioni chimiche possono essere influenzate da forze meccaniche 184
Esempio 4.8 L'energia potenziale gravitazionale per un pendolo semplice 185 – Esempio 4.9 Una massa fermata da una molla su un piano inclinato 187

4.12 Il potenziale di Lennard-Jones 187
Esempio 4.10 I parametri ε e σ del potenziale di Lennard-Jones 189 – Esempio 4.11 Un sistema legato 190

4.13 La meccanica dei muscoli scheletrici 191
Esercizi svolti, bibliografia e sitografia del capitolo

Capitolo 5
La meccanica rotazionale e gli urti 197

5.1 Dal punto materiale ai corpi estesi 198
5.2 Il centro di massa 199
Esempio 5.1 Dove si trova il centro di massa? 200 – Esempio 5.2 Il centro di massa per una sbarra rettilinea 201

5.3 Cinematica e dinamica del centro di massa 202
5.4 La cinematica rotazionale 204
Esempio 5.3 Il moto rotazionale di una centrifuga 207 – Esempio 5.4 Il moto rotatorio in biologia 208 – Esempio 5.5 Il batterio che nuota 210

5.5 L'energia cinetica rotazionale 211
Esempio 5.6 Il momento d'inerzia per quattro punti materiali 212

5.6 Il calcolo del momento d'inerzia rotazionale 212
5.7 Il teorema degli assi paralleli 214
5.8 Il momento di una forza 217
Esempio 5.7 Il centro di massa e il centro di gravità di un corpo 218
5.9 La coppia di forze 220
5.10 L'equilibrio dei corpi 220
Esempio 5.8 L'equilibrio di una tavola sollevata da due persone 220 – Esempio 5.9 Il tuffatore dal trampolino 221 – Esempio 5.10 Tenere un'asse in posizione orizzontale con una fune 222 – Esempio 5.11 Sollevare una massa 223
5.11 La dinamica rotazionale 224
Esempio 5.12 Fermare un'ultracentrifuga 225
5.12 Il lavoro nel moto rotatorio 226
Esempio 5.13 La puleggia massiva 226 – Esempio 5.14 La macchina di Atwood con puleggia massiva 229 – Esempio 5.15 La composizione dei moti traslazionale e rotazionale 230 – Esempio 5.16 Conservazione dell'energia meccanica 231 – Esempio 5.17 Il pendolo fisico o composto 233 – Esempio 5.18 L'orologio a pendolo 235 – Esempio 5.19 La forza di attrito per il rotolamento 236
5.13 Le leve 237
Esempio 5.20 Una leva del I genere 239 – Esempio 5.21 Le carrucole come leve del I o II genere 239
5.14 Le leve nel corpo umano 240
5.15 Il momento angolare 241
5.15.1 La conservazione del momento angolare 242
Esempio 5.22 La conservazione del momento angolare per la ballerina 243
5.16 Il moto della trottola: la precessione 244
5.17 Gli urti 245
5.17.1 L'urto totalmente anelastico 245
Esempio 5.23 Un proiettile conficcato nel bersaglio 245
5.17.2 Urti elastici 245
Esempio 5.24 Due pendoli che si urtano 245 – Esempio 5.25 Il rallentamento dei neutroni e gli urti nel sistema del centro di massa 245 – Esempio 5.26 L'urto elastico di un neutrone con un nucleo di carbonio 245 – Esempio 5.27 Un urto in due dimensioni tra particelle di uguale massa 245
5.17.3 Urti anelastici 245
Esempio 5.28 L'urto anelastico in due dimensioni 245
5.18 Gli urti e la cinetica delle reazioni chimiche 246
Esercizi svolti, bibliografia e sitografia del capitolo

Capitolo 6
Oscillazioni e onde meccaniche 247

6.1 Le oscillazioni nel mondo biologico 248
6.2 Il prototipo di moto periodico: il moto di un corpo agganciato a una molla 249
6.3 L'energia associata a un moto oscillatorio 251
Esempio 6.1 La velocità di una massa agganciata a una molla 252
6.4 Oscillazioni in presenza di attrito: le oscillazioni smorzate 252
6.4.1 Il moto sottosmorzato 253
6.4.2. Il moto sovrasmorzato 253
6.4.3 Il moto criticamente smorzato 254
6.5 Oscillazioni forzate e smorzate: la risonanza 254
6.6 Potenza dissipata e potenza trasferita per un oscillatore smorzato forzato 257
6.7 Il fattore di qualità della risonanza 258
6.7.1 Il caso del Tacoma Bridge 258
6.8 Le onde meccaniche 259
Esempio 6.2 Le onde sulla superficie dell'acqua 261
6.9 La rappresentazione analitica di un'onda che si propaga 261
Esempio 6.3 L'ampiezza di un'onda 263
6.10 L'energia associata a un'onda 263
Approfondimento – Dimostrazione Equazione [6.21] 264
6.11 La riflessione delle onde 264
Approfondimento – Dimostrazione Equazione [6.23] 265
6.12 L'equazione d'onda lineare 266
Approfondimento – Dimostrazione Equazione [6.24] 266
6.13 L'interferenza tra onde 268
6.13.1 L'interferenza tra onde prodotte da due sorgenti 270
Esempio 6.4 L'interferenza tra due onde che si propagano 271
6.14 Il principio di Huygens 272
6.15 La diffrazione 273
6.16 Le onde stazionarie nelle corde 274
6.16.1 Le onde stazionarie in una corda di chitarra 276
6.17 Il suono 277
Approfondimento – Relazione tra la pressione massima e lo spostamento massimo di un'onda acustica 278
6.17.1 L'impedenza acustica nella propagazione del suono 279
6.17.2 La velocità di propagazione delle onde acustiche 279
Esempio 6.5 Un'onda acustica che si propaga dall'aria all'acqua 280
6.17.3 L'intensità del suono 280
6.18 Le onde stazionarie nei tubi 284
6.19 I battimenti 285
6.20 La dispersione 287
6.21 L'effetto Doppler 288
6.21.1 Sorgente in movimento, ricevitore fermo 289
6.21.2 Sorgente ferma, ricevitore in movimento 290
6.21.3 Sorgente e ricevitore in movimento 290
6.22 Velocità di gruppo e velocità di fase di un pacchetto d'onde 291
6.23 Fisica e biologia del sistema uditivo 292
Esempio 6.6 L'orecchio medio approssimato con una leva 295
6.23.1 Come può l'orecchio essere sensibile e anche riconoscere le diverse frequenze presenti in un suono? 296
6.24 Numeri complessi e rappresentazione dei fenomeni ondulatori 298
6.25 Serie e trasformata di Fourier 301

© 978-88-08-92045-4

6.26 Tecniche spettroscopiche basate sulla trasformata di Fourier 306
Esercizi svolti, bibliografia e sitografia del capitolo

Capitolo 7
Statica dei fluidi 307

7.1 I fluidi e la biologia 308
7.2 Che cos'è un fluido? 310
7.3 La pressione 311
7.4 La legge di Stevino 313
7.4.1 I paradossi dell'idrostatica 315
Esempio 7.1 Due liquidi in un tubo a U 317 – Esempio 7.2 La forza totale per resistere a un bacino d'acqua 319
7.5 Il principio dei vasi comunicanti 319
7.6 La legge di Pascal 319
7.6.1 La pressa idraulica 320
7.7 Misura della pressione ed esperimento di Torricelli: il vuoto 320
Esempio 7.3 La misura della pressione con il manometro 323 – Esempio 7.4 Il peso dell'aria 323
7.8 Il principio di Archimede e il galleggiamento 324
Esempio 7.5 Attenti all'insidia 325 – Esempio 7.6 Come calcolare la densità di un corpo 325 – Esempio 7.7 È solo la punta dell'iceberg! 326 – Esempio 7.8 La bilancia idrostatica 327 – Esempio 7.9 Immergere completamente un corpo 328 – Esempio 7.10 La spinta di Archimede vale anche per i gas: la mongolfiera 328 – Esempio 7.11 Il capodoglio conosce la spinta di Archimede! 330
7.9 Un caso per l'unità CSI (*Crime Scene Investigation*) *ante litteram* 330
7.10 Alcune riflessioni sul principio di Archimede 331
Esempio 7.12 Il comportamento delle proteine all'interno di una provetta 332
Esercizi svolti, bibliografia e sitografia del capitolo

Capitolo 8
I fluidi in moto 333

8.1 Muoversi in un fluido 334
8.2 Un po' di storia della scienza relativa alla trattazione dei fluidi in moto 335
8.3 L'equazione di continuità 337
Esempio 8.1 Un flusso d'acqua sotto l'effetto della forza gravitazionale 338
Nota storica – Stratone di Lampsaco e la caduta dei gravi 339
8.4 L'equazione di Bernoulli 339
8.4.1 Derivazione alternativa dell'equazione di Bernoulli 342
8.5 Applicazioni dell'equazione di Bernoulli 342
Esempio 8.2 Flusso e differenza di pressione 342 – Esempio 8.3 Il tubo di Venturi 343 – Esempio 8.4 Il teorema di Torricelli 343 –Esempio 8.5 Il sifone 344
Nota storica – Torricelli vs Bernouilli 345
8.6 Come volano gli aeroplani 345
8.7 La viscosità 345
8.8 La matematica per la dinamica dei fluidi 346
8.9 La viscosità dell'acqua e del citoplasma cellulare 346
8.10 I fluidi reali: legge di Poiseuille e profilo delle velocità in un tubo di flusso 348
Esempio 8.6 La differenza di pressione e la portata 351
8.11 Il numero di Reynolds 352
8.12 La vita ai bassi numeri di Reynolds 354
8.12.1 Un modello quantitativo per il moto del flagello di un batterio 356
8.12.2 Il movimento ciliato 358
8.13 Sedimentazione e centrifugazione 358
8.13.1 L'effetto della diffusione nel processo di sedimentazione 363
8.14 La fisica della microfluidica 364
8.15 Il flusso del sangue 367
8.15.1 La misurazione della pressione del sangue 368
Esercizi svolti, bibliografia e sitografia del capitolo

Capitolo 9
La tensione superficiale 369

9.1 L'importanza dei fenomeni di tensione superficiale in biologia 370
9.2 Cos'è la tensione superficiale? 371
9.3 L'origine microscopica della tensione superficiale 374
9.4 Coesione e adesione 377
9.5 Misura della tensione superficiale 378
9.6 I tensioattivi 380
9.6.1 I detergenti in biochimica 382
Esempio 9.1 Determinare la CMC di un detergente 382
9.7 Il modello della membrana biologica 385
9.7.1 Il ruolo di Benjamin Franklin 385
9.7.2 Un esperimento semplice e decisivo 386
9.7.3 Conclusioni 388
9.8 Le bolle di sapone 389
9.9 Una camminata sull'acqua 389
Esempio 9.2 Il massimo peso di un insetto per poter camminare sull'acqua 390
9.10 La legge di Laplace 391
9.10.1 La dimostrazione della legge di Laplace generale 392
Esempio 9.3 La differenza di pressione per una bolla di sapone 394 – Esempio 9.4 Perché una bolla di sapone sembra salire verso l'alto? 394
9.11 Le applicazioni della legge di Laplace 395
9.11.1 Gonfiare un palloncino 396
9.11.2 Gli alveoli polmonari 397
9.11.3 Aspirazione di liposomi e cellule con micropipette 398
9.12 L'angolo di contatto e l'equazione di Young 401

9.13 La tensione superficiale e le cellule 402
Esempio 9.5 Una goccia d'acqua in equilibrio sul vetro di una finestra 405 – Esempio 9.6 La bagnabilità delle foglie e l'effetto loto delle piante 405

9.14 La legge di Jurin 406
Esempio 9.7 Lo xilema nelle piante 408 – Esempio 9.8 La risalita dell'acqua in capillari di diverso raggio 408 – Esempio 9.9 Un capillare di vetro e il mercurio 409

9.15 Forze dovute ai fenomeni di capillarità 409

Esercizi svolti, bibliografia e sitografia del capitolo

Capitolo 10
Introduzione alla termodinamica 411

10.1 La termodinamica per la biologia 412
Nota storica – Mayer e il colore del sangue 413

10.2. Introduzione al concetto di temperatura 414
10.2.1 I termorecettori 415
10.2.2 L'energia nelle cellule 416

10.3 Alcune definizioni per un sistema termodinamico 416

10.4 La temperatura e il principio zero della termodinamica 417
10.4.1 Le scale termometriche e la scala Kelvin 419

10.5 Le variabili termodinamiche e gli stati di equilibrio 421

10.6 Il calore e l'equivalente meccanico del calore 423
Esempio 10.1 L'energia meccanica dissipata nell'esperimento di Joule 426 – Esempio 10.2 Il calore specifico di un materiale 428 – Esempio 10.3 La capacità termica del calorimetro 429

10.7 La storia del concetto di calore 429

10.8 I gas perfetti 431
10.8.1 Le trasformazioni dei gas 431
10.8.2 L'equazione di stato dei gas perfetti 435
Esempio 10.4 Raffreddare un gas 437 – Esempio 10.5 Il numero di molecole in un volume di gas 437 – Esempio 10.6 Il peso molecolare di un gas 438

10.9 L'equazione di van der Waals 438

10.10 La teoria cinetica dei gas 441
10.10.1 Introduzione 441
10.10.2 Interpretazione molecolare della pressione e della temperatura 442
Esempio 10.7 La velocità media delle molecole di aria 445 – Esempio 10.8 Un gas perfetto all'interno di un cubo 446 – Esempio 10.9 Due gas diversi 447
10.10.3 Equipartizione dell'energia 447
10.10.4 Il libero cammino medio 449
10.10.5 La distribuzione di Maxwell delle velocità in un gas 451
Esempio 10.10 Sfruttare la funzione di distribuzione delle velocità molecolari 454 – Esempio 10.11 Il libero cammino medio e il tempo tra due urti successivi 457

10.11 La velocità delle molecole e la costante di velocità di una reazione chimica 458
10.11.1 La formula di Arrhenius per la costante di velocità di reazione 459
Nota storica – La legge di eponimia di Stigler 460
10.11.2 La determinazione sperimentale dell'energia di attivazione 461
Esempio 10.12 Q_{10} di canali ionici 462

Esercizi svolti, bibliografia e sitografia del capitolo

Capitolo 11
Il primo principio della termodinamica 463

11.1 Introduzione 464

11.2 Una revisione del concetto di lavoro 465
11.2.1 Il diagramma p–V 468

11.3 L'energia interna 469
Esempio 11.1 Movimento microscopico e movimento macroscopico 472

11.4 Il primo principio della termodinamica: il principio di conservazione dell'energia 472
Approfondimento – I differenziali esatti e non esatti e la termodinamica 473

11.5 L'energia interna di un gas perfetto nell'esperimento di Joule-Kelvin 473

11.6 La capacità termica: un approfondimento 475

11.7 Capacità termiche molari di un gas perfetto ed energia interna 476

11.8 Alcune particolari trasformazioni dei gas perfetti 479
11.8.1 Trasformazione isoterma 480
11.8.2 Trasformazione isocora 481
Esempio 11.2 Una trasformazione isocora 482
11.8.3 Trasformazione isobara 482
Esempio 11.3 Una trasformazione a pressione costante 483 – Esempio 11.4 Tre diverse trasformazioni tra gli stessi punti iniziale e finale 484 – Esempio 11.5 Il lavoro in una trasformazione ciclica 485
11.8.4 Trasformazioni adiabatiche 486
Esempio 11.6 Una trasformazione adiabatica 488

11.9 Alcune considerazioni sulle trasformazioni reversibili 489

11.10 La funzione entalpia 492
11.10.1 Entalpia e reazioni chimiche 494

11.11 Il contenuto in energia del cibo 495

11.12 Le transizioni di fase 496
11.12.1 Introduzione e loro rilevanza in biologia 496
11.12.2 Transizioni di fase e diagramma di fase 500
11.12.3 Equilibrio tra fasi diverse e calore latente 504
Esempio 11.7 Il calore latente di fusione 505 – Esempio 11.8 Il calore latente di fusione dell'alluminio 506 – Esempio 11.9 Un percorso attorno al punto critico 507 – Esempio 11.10 Il calcolo del calore scambiato quando il calore specifico dipende dalla temperatura 508

11.13 L'isoterma di van der Waals 509

11.14 Le tecniche calorimetriche per la biochimica 512
11.14.1 Calorimetria differenziale a scansione 512
11.14.2 Calorimetria di titolazione isoterma (ITC) 514

11.15 Il trasporto del calore 517
11.15.1 L'equazione della conduzione 518

Esercizi svolti, bibliografia e sitografia del capitolo

© 978-88-08-92045-4

Capitolo 12

Il secondo principio della termodinamica e l'energia libera 519

12.1 L'entropia e le energie libere in biologia 520

12.2 Le macchine termiche e il ciclo di Carnot 522

Esempio 12.1 Il rendimento di una macchina reversibile 525– Esempio 12.2 Dal rendimento al lavoro prodotto da una macchina termica 526 – Esempio 12.3 Il calore ceduto in un ciclo di Carnot 526

12.3 La funzione entropia 526

12.4 La storia del concetto di entropia e il secondo principio della termodinamica 531

12.5 Le diverse formulazioni del secondo principio della termodinamica 534

12.6 L'entropia per i gas perfetti 536

12.7 Il concetto di energia libera 537

12.7.1 L'energia libera di Helmoltz 539

12.7.2 L'energia libera di Gibbs 539

12.7.3 La dipendenza dell'energia libera dalla pressione e dalla temperatura 542

Esempio 12.4 Il diagramma di fase per le aggregazioni del carbonio 544

12.8 Il potenziale chimico 545

12.9 Alcune utili relazioni e uguaglianze termodinamiche 550

12.10 Biologia ed entropia alla scala delle singole molecole biologiche 551

12.11 Il cricchetto di Feynman 556

12.12 Le transizioni di fase in termini di energia libera di una fase 558

12.12.1 La classificazione delle transizioni di fase 562

12.12.2 L'equazione di Clausius-Clapeyron 562

12.12.3 La tangente comune 563

12.13 La termodinamica delle miscele binarie 563

Esempio 12.5 Calcolo dell'entropia di miscelazione 567

12.13.1 La regola della leva 568

12.14 L'energia libera associata alla denaturazione delle proteine 568

Esercizi svolti, bibliografia e sitografia del capitolo

Capitolo 13

La meccanica statistica 571

13.1 I processi biologici analizzati con la meccanica statistica 572

13.2 Breve storia della nascita della meccanica statistica 574

Nota storica – La figura di Joseph Loschmidt 576

13.3 Qualche importante formula di statistica 578

13.3.1 La statistica per l'interpretazione molecolare della termodinamica 578

13.3.2 Le approssimazioni per un numero elevato di particelle 583

13.3.3 Le distribuzioni di probabilità 584

Esempio 13.1 La distribuzione di Gauss 586 – Esempio 13.2 Testa o croce 588

13.4 La distribuzione di Boltzmann 589

13.4.1 Espansione di un gas 589

13.4.2 Microstati e macrostati 590

13.4.3 L'ipotesi ergodica 592

Esempio 13.3 Il numero massimo di combinazioni 595

13.4.4 La relazione di Boltzmann dell'entropia statistica 597

Approfondimento – La dimostrazione del fattore di proporzionalità coincidente con k_B 598

Esempio 13.4 La distribuzione di Boltzmann per la concentrazione di molecole nel gas atmosferico 599

13.4.5 L'equivalenza tra entropia statistica ed entropia termodinamica 600

13.4.6 La funzione di partizione 602

13.4.7 Il potenziale chimico in presenza di un potenziale esterno 604

13.4.8 Le fluttuazioni e la funzione di partizione 605

Esempio 13.5 Dalla molteplicità degli stati alla probabilità di occupazione dei livelli energetici 605

13.4.9 Dal minimo per l'energia libera alla distribuzione di Boltzmann 606

13.5 La meccanica statistica applicata ai sistemi biologici 606

13.5.1 L'applicazione della meccanica statistica ai canali ionici 607

13.5.2 L'applicazione della meccanica statistica al sistema recettore/ligando 609

13.6 L'entropia delle miscele 613

Esempio 13.6 La funzione variazione di energia libera per una miscela binaria 616

Esercizi svolti, bibliografia e sitografia del capitolo

Capitolo 14

La meccanica dei corpi estesi deformabili 617

14.1 Introduzione alla reologia

14.2 Un po' di storia della reologia

14.3 Alcune definizioni per partire

14.4 Le proprietà meccaniche di un mezzo e la velocità di propagazione del suono in esso

Esempio 14.1 La differenza tra le formule di Newton e quelle di Laplace

14.5 Le proprietà elastiche di una sbarra

14.6 Le proprietà viscoelastiche

14.6.1 Analogia basata su molle e dissipatori

14.6.2 Modelli viscoelastici (Maxwell, Voigt, Kelvin, Burger)

14.6.3 Analisi dinamica

Esempio 14.2 Il modello che descrive il comportamento di cellule in un esperimento di aspirazione con micropipette – Esempio 14.3 Un circuito meccanico stimolato a bassa e alta frequenza

14.7 La viscoelasticità in biologia

14.8 Il modello a frizione molecolare

14.9 Il microscopio a forza atomica

14.9.1 Il microscopio a forza atomica può misurare le proprietà meccaniche di campioni biologici

Esercizi svolti, bibliografia e sitografia del capitolo

Capitolo 15
Random walk e diffusione 619

15.1 L'importanza delle fluttuazioni in biologia 620
15.2 L'eterna danza delle molecole e la fine della convinzione: «*Si muove, allora è vivo!*» 621
15.3 La misura della costante di Avogadro da parte di Perrin 622
15.4 Random walk in una e più dimensioni 624
15.5 L'equazione di Langevin 627
15.6 Cosa succede con il secondo principio della termodinamica? 628
15.7 Random walk nel caso dei polimeri biologici 630
15.8 Le leggi di Fick 634
Esempio 15.1 Una soluzione della seconda legge di Fick nel caso unidimensionale 636 – Esempio 15.2 La diffusione delle proteine 637 – Esempio 15.3 La diffusione all'interno di una cellula 637
15.9 La diffusione in presenza di una forza di deriva 638
15.10 La relazione di Einstein tra diffusione e viscosità 638
15.11 Esiste un modello matematico per descrivere la migrazione di cellule? 639
15.12 Tecniche per studiare la diffusione in sistemi biologici 643
15.12.1 Recupero della fluorescenza dopo *photobleaching* 644
15.12.2 Tracciamento di singola particella 645
15.13 I motori molecolari e i diagrammi di energia potenziale 648
15.14 L'osmosi 651
15.14.1 L'equazione di van't Hoff 652
Nota storica – Einstein, l'osmosi e gli atomi 655
Esercizi svolti, bibliografia e sitografia del capitolo

Capitolo 16
La carica elettrica e il campo elettrico 657

16.1 L'elettricità in biologia 658
Nota storica – Un po' di storia delle interazioni elettriche 659
16.2 L'elettrizzazione degli oggetti 660
Esempio 16.1 L'equilibrio tra due cariche elettriche sotto l'effetto della forza peso 664
16.3 Il campo elettrico 666
16.4 Il dipolo elettrico 668
16.4.1 Espressione generale per il campo elettrico a grande distanza da un dipolo 670
Esempio 16.2 Il momento di dipolo elettrico di una molecola d'acqua 672 – Esempio 16.3 Il momento di dipolo elettrico del legame peptidico 673 – Esempio 16.4 Il momento di dipolo elettrico associato con un'α-elica 674
16.5 Il flusso del campo elettrico 675
16.6 Il teorema di Gauss 676
16.7 Il campo elettrico di distribuzioni simmetriche di carica elettrica 677
16.7.1 Carica isolata: simmetria sferica 677
16.7.2 Filo di lunghezza infinita uniformemente carico: simmetria cilindrica 678
16.7.3 Superficie piana infinita uniformemente carica 679
16.7.4 Campo elettrico tra due superfici infinite uniformemente cariche 681
16.7.5 Campo elettrico prodotto da una densità di carica su una lamina rettangolare infinita di spessore *h* 681
Esempio 16.5 Un pendolo elettricamente carico all'interno di un condensatore a facce piane e parallele 682 – Esempio 16.6 Il campo elettrico di una sfera isolante uniformemente carica 683 – Esempio 16.7 Il campo elettrico prodotto da un guscio sferico 684
16.8 Il moto di particelle cariche in un campo uniforme 685
16.9 Il campo elettrico per un conduttore in equilibrio 686
16.10 L'energia potenziale elettrica e il potenziale elettrico 686
16.11 Energia potenziale e potenziale elettrostatico di una carica 688
16.11.1 Il potenziale elettrico di un conduttore 690
16.12 La schermatura elettrica e la gabbia di Faraday 691
16.13 L'energia potenziale di una configurazione di cariche elettriche 692
Esempio 16.8 L'energia potenziale elettrica per una configurazione di quattro cariche 693 – Esempio 16.9 La stabilità tra più di due cariche elettriche 693 – Esempio 16.10 Equilibrio di una carica con due cariche di segno opposto 693
16.14 La forza di Coulomb e la stabilità dei cristalli ionici 693
16.15 Superfici equipotenziali 694
16.16 La relazione tra campo elettrico e potenziale elettrico 694
16.17 Il potenziale elettrico di un dipolo 695
16.18 Il potenziale elettrico e l'impollinazione: l'elettricità per la vita 696
16.19 Le onde di potenziale elettrico nel corpo umano 697
16.20 L'equazione di Poisson 700
Esempio 16.11 L'utilizzo dell'equazione di Laplace 700
16.21 L'energia potenziale di un dipolo in un campo elettrico 700
16.22 La capacità elettrica 701
16.22.1 Condensatore a facce piane e parallele 702
16.22.2 Condensatore cilindrico 703
16.22.3 Condensatore sferico 704
16.23 L'energia immagazzinata in un condensatore 705
16.23.1 La forza tra le armature di un condensatore 706
Esempio 16.12 La forza tra le facce di un condensatore 707

© 978-88-08-92045-4

16.24 Il condensatore con dielettrico 708
16.24.1 Il vettore spostamento elettrico 710
16.25 La fisica dell'elettroporazione cellulare 712
16.26 Il collegamento di condensatori in serie e in parallelo 715
Esempio 16.13 Condensatori in serie e in parallelo 717 – Esempio 16.14 Un condensatore con un dielettrico al suo interno 717 – Esempio 16.15 Inserire un dielettrico in un condensatore carico 718

Esercizi svolti, bibliografia e sitografia del capitolo

Capitolo 17
Le correnti elettriche 719

17.1 Un flusso di cariche elettriche genera una corrente elettrica 720
17.2 La definizione di corrente elettrica 721
17.3 L'interpretazione microscopica della corrente elettrica 722
17.4 Le leggi di Ohm 725
Esempio 17.1 Un po' di stime 726 – Esempio 17.2 Non tutti i conduttori sono ohmici 728

17.5 Un accenno alle moderne teorie per la conduzione elettrica nei conduttori 729
17.6 Resistenze in serie e in parallelo 729
17.6.1 Resistenze in serie 730
17.6.2 Resistenze in parallelo 731
Esempio 17.3 Resistenza equivalente 732 – Esempio 17.4 Resistenze in serie e in parallelo 732

17.7 L'effetto Joule: la potenza dissipata 732
Esempio 17.5 Massimizzare la dissipazione 733

17.8 La pila di Volta: un po' di storia 734
17.9 La batteria 736
Esempio 17.6 Il potenziale di una cella con elettrodo di zinco 738
17.9.1 La pila Daniell 738

17.10 Circuiti elettrici in corrente continua 738
17.10.1 Le leggi di Kirchhoff per i circuiti elettrici 739
Esempio 17.7 Le leggi di Kirchhoff 740 – Esempio 17.8 Un circuito con tre maglie indipendenti 740

17.11 Carica e scarica di un condensatore in un circuito RC 741
17.11.1 Processo di carica 741
Approfondimento – Il processo di carica di un condensatore 742

17.11.2 Processo di scarica 743
Esempio 17.9 La carica di un condensatore 746 – Esempio 17.10 La scarica di un condensatore 746

17.12 Le correnti in soluzione 747
17.12.1 La conducibilità delle soluzioni elettrolitiche 747
17.13 Elettrolisi e leggi di Faraday 747
17.14 Gli effetti della corrente sul corpo umano 748

Esercizi svolti, bibliografia e sitografia del capitolo

Capitolo 18
Il campo elettrico in soluzione e l'elettricità nei sistemi biologici 749

18.1 In biologia il campo elettrico rilevante è quello che si ha in soluzione acquosa 750
18.2 La molecola dell'acqua 751
18.2.1 L'acqua come dielettrico 752
18.3 L'energia di Born 754
18.4 Le interazioni che stabilizzano le molecole biologiche 756
18.4.1 Il legame a idrogeno 756
18.4.2 Le interazioni idrofobiche 757
18.5 Le forze intermolecolari in soluzione 758
Approfondimento – Dimostrazione dello sviluppo in multipoli per una distribuzione di cariche 759

18.6 Interazioni tra dipoli e cariche elettriche 760
18.7 Le forze di van der Waals 762
18.7.1 L'interazione tra due dipoli permanenti (interazione di Keesom) 762
18.7.2 L'interazione di un dipolo permanente con un dipolo indotto (interazione di Debye) 763
18.7.3 L'interazione tra due dipoli transienti (interazione di London o di dispersione) 764
18.7.4 Sintesi delle interazioni di van der Waals 765
Esempio 18.1 Le forze di van der Waals e i gechi 766

18.8 Il campo elettrico prodotto da superfici cariche in soluzione 767
18.8.1 La struttura del doppio strato diffuso 770
Esempio 18.2 La condensazione del DNA 771 – Esempio 18.3 L'effetto della forza ionica della soluzione sulle reazioni enzimatiche 772 –

18.9 L'equazione di Nernst per la distribuzione degli ioni 773
Esempio 18.4 Il potenziale attraverso una membrana dell'assone gigante del calamaro 776 – Esempio 18.5 I potenziali di transmembrana 777

18.10 La membrana biologica come elemento di un circuito elettrico 777
18.11 Il potenziale elettrico attraverso la membrana biologica 782
18.12 I canali ionici dipendenti dalla differenza di potenziale attraverso la membrana 783
18.13 Il potenziale d'azione e la sua propagazione 785
Nota storica – La controversia Galvani-Volta 789

18.14 Le tecniche di elettrofisiologia per lo studio dei canali ionici 789
18.15 L'elettroforesi 789
18.15.1 L'elettroforesi del DNA 794
18.15.2 L'elettroforesi delle proteine 796
18.16 Il modello di conduzione a cavo per l'assone e l'equazione del telegrafo 796
18.17 L'equazione del cavo 796

Esercizi svolti, bibliografia e sitografia del capitolo

Capitolo 19
Il campo magnetico 797

19.1 Il campo magnetico e la sua rilevanza per i sistemi biologici 798
19.2 Il campo magnetico: introduzione 799
19.3 La definizione di campo magnetico: la forza di Lorentz 801
19.4 Il moto di una particella carica all'interno di campi magnetici uniformi 803
Esempio 19.1 Calcolo del passo del moto elicoidale di una carica elettrica in un campo magnetico uniforme 804
19.4.1 Il selettore di velocità e lo spettrometro di massa 805
Esempio 19.2 Come trovare il numero di neutroni in un isotopo 807 – Esempio 19.3 Un fascio di ossigeno ionizzato 807 – Esempio 19.4 Le lenti di un microscopio elettronico 808
19.4.2 Il microscopio elettronico 810
19.5 La forza su un filo percorso da corrente posto all'interno di un campo magnetico 812
19.6 Una spira percorsa da corrente all'interno di un campo magnetico 814
19.7 All'interno di un campo magnetico non uniforme 817
19.8 La quantizzazione del momento angolare e lo spin dell'elettrone 819
19.9 Il campo magnetico generato da un filo percorso da corrente 821
Esempio 19.5 Il campo magnetico prodotto da due fili percorsi da corrente 823
19.9.1 Il campo magnetico generato da una spira percorsa da corrente 824
19.10 L'interazione tra due fili percorsi da corrente 826
19.11 Il teorema di Ampère 827
19.11.1 Il campo magnetico di un solenoide 829
Esempio 19.6 Le spire di un selenoide 830 – Esempio 19.7 Il campo magnetico prodotto da un avvolgimento toroidale 830
19.12 Il campo magnetico e i sistemi di riferimento in moto relativo 831
19.13 La magnetoricezione negli animali 831
19.14 I fenomeni elettrici e magnetici per la diagnostica medica 836
Esercizi svolti, bibliografia e sitografia del capitolo

Capitolo 20
L'induzione elettromagnetica e le correnti alternate 839

20.1 L'effetto del flusso di un campo magnetico variabile nel tempo 840
20.2 L'induzione elettromagnetica e la legge di Faraday 841
Esempio 20.1 Una spira circolare in un campo magnetico variabile 843 – Esempio 20.2 La forza elettromotrice indotta in una spira in movimento 844 – Esempio 20.3 Una spira elastica conduttrice 845
20.2.1 Gli alternatori 846
20.3 La legge di Lenz 847
Esempio 20.4 Una forza elettromotrice indotta in una spira ruotante 848 – Esempio 20.5 Una spira all'interno di un solenoide 849
20.4 La differenza di potenziale ai capi di un conduttore in moto in un campo magnetico 849
Esempio 20.6 Rallentare con un campo magnetico 851 – Esempio 20.7 Una sbarra conduttrice in caduta all'Equatore 852 – Esempio 20.8 La differenza di potenziale sulle ali di un aereo 852 – Esempio 20.9 Una sbarra conduttrice in rotazione 853
20.5 Il fenomeno dell'autoinduzione e l'induttanza 853
20.5.1 L'induttanza di un solenoide 855
Esempio 20.10 L'autoinduzione in un circuito 855
20.5.2 L'energia in un campo magnetico 856
20.5.3 Un circuito *RL* in corrente continua 857
20.5.4 I circuiti *LC* 858
20.5.5 Il circuito *RLC* in serie 860
Esempio 20.11 Oscillazioni libere del circuito RLC *in serie 861*
20.6 La risonanza magnetica nucleare 862
Approfondimento – Perché la frequenza di precessione coincide con la frequenza assorbita dai nuclei? 869
Approfondimento – Il sistema di riferimento rotante 870
Esempio 20.12 Il valore di frequenza del fotone assorbito da un nucleo ^{1}H 871
20.6.1 La risonanza magnetica nucleare come strumento spettroscopico 871
20.6.2 Imaging con NMR 872
20.7 Le correnti elettriche alternate 874
20.7.1 Il circuito *RLC* 878
20.7.2 Il circuito risonante *RLC* 878
20.7.3 Il valore efficace 878
20.7.4 Il trasformatore 878
20.7.5 Le correnti elettriche alternate trattate con i numeri complessi 878
Esempio 20.13 Il circuito di selezione di un canale in una radio 878
20.8 Analogia tra circuiti elettrici meccanici e acustici 878
Esercizi svolti, bibliografia e sitografia del capitolo

Capitolo 21
Il campo elettromagnetico secondo Maxwell 879

21.1 Introduzione storica 880
21.2 La corrente di spostamento 883
21.3 Gradiente di un campo scalare, rotore e divergenza di un campo vettoriale 885
21.4 Le equazioni di Maxwell 885

© 978-88-08-92045-4

21.4.1 Prima equazione di Maxwell 885
21.4.2 Seconda equazione di Maxwell 886
21.4.3 Terza equazione di Maxwell 887
21.4.4 Quarta equazione di Maxwell 887

21.5 Dalle equazioni di Maxwell alle onde elettromagnetiche 888
Esempio 21.1 Verifichiamo che la quantità $\frac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}}$ *ha le dimensioni di una velocità 891*

21.6 Le proprietà delle onde elettromagnetiche 892
Esempio 21.2 Qual è la direzione del campo magnetico rispetto alla direzione del campo elettrico per un'onda elettromagnetica? 894

21.6.1 Energia trasportata da un'onda elettromagnetica e sua quantità di moto 895

21.7 Il vettore di Poynting 896
21.7.1 La pressione di radiazione 897
Esempio 21.3 La pressione di radiazione e la coda delle comete 898

21.8 Le pinze ottiche 899
21.9 La radiazione emessa da una carica elettrica accelerata 902
21.10 La produzione di onde elettromagnetiche 904
Esempio 21.4 Dall'intensità al valore del campo elettrico 907

21.11 L'esperimento di Hertz 907
21.12 Lo spettro delle onde elettromagnetiche 911

Esercizi svolti, bibliografia e sitografia del capitolo

Capitolo 22
Ottica geometrica 917

22.1 La luce e la materia 918
22.2 I raggi dell'ottica geometrica 919
22.3 La riflessione 921
22.3.1 Il principio di Fermat 921
Esempio 22.1 La riflessione e l'acustica 922
Nota storica – La riflessione secondo Erone di Alessandria 923

22.4 La rifrazione: l'indice di rifrazione 923
22.4.1 Il principio di Fermat per la rifrazione della luce 926
22.4.2 La rifrazione della luce spiegata con il principio di Huygens 927
Esempio 22.2 La rifrazione attraverso una lamina a facce piane e parallele 928 – Esempio 22.3 La profondità apparente 929 – Esempio 22.4 La rifrazione della luce nell'atmosfera al tramonto 930

22.5 La riflessione interna totale 930
22.5.1 Le fibre ottiche 932
Esempio 22.5 Il calcolo dell'angolo limite di accettazione per i raggi che entrano in una fibra ottica 933

22.6 Il prisma e la dispersione della luce 934
*Nota storica – L'*Experimentum crucis *di Newton 936*
22.6.1 L'arcobaleno 937

22.7 Immagini formate dagli specchi 939
22.7.1 Specchi piani 941
Esempio 22.6 Due specchi piani 941
22.7.2 Specchi concavi 942
Esempio 22.7 Un oggetto posto tra uno specchio concavo e il suo fuoco 945 – Esempio 22.8 Un oggetto posizionato tra il centro di curvatura e il fuoco di uno specchio concavo 946 – Esempio 22.9 L'immagine formata da uno specchio concavo 946
22.7.3 Specchi convessi 947
Esempio 22.10 Il raggio di curvatura di uno specchio convesso 948 –Esempio 22.11 L'immagine prodotta da uno specchio convesso 948
22.7.4 Il fuoco di uno specchio curvo e il riflettore parabolico 949

22.8 Il diottro sferico 949
Esempio 22.12 L'ingrandimento trasversale di un diottro sferico 951

22.9 Sistemi ottici centrati ed equazione dei costruttori di lenti 954
22.10 Lenti sottili 955
22.10.1 Lenti convergenti 958
22.10.2 L'ingrandimento prodotto da una lente 960
Esempio 22.13 La formazione di un'immagine con una lente convergente 961
22.10.3 Raggi obliqui rispetto all'asse ottico 962
22.10.4 Lenti divergenti 962
Esempio 22.14 La formazione di un'immagine con una lente divergente 964

Esercizi svolti, bibliografia e sitografia del capitolo

Capitolo 23
Ottica ondulatoria 965

23.1 La natura ondulatoria della luce 966
23.2 L'esperimento di Young della doppia fenditura 967
Esempio 23.1 Misurare la lunghezza d'onda di una radiazione con l'esperimento di Young 971
23.2.1 L'intensità luminosa delle bande di interferenza 971
23.2.2 L'interferenza prodotta da tre o più fenditure 972

23.3 L'interferenza da lamine sottili 972
23.3.1 Ricoprimenti antiriflesso 974
Esempio 23.2 Uno strato di olio sull'acqua 976 – Esempio 23.3 Un ricoprimento antiriflesso 976 – Esempio 23.4 Una lamina d'acqua sempre più sottile 977
23.3.2 Interferenza di strati multipli 978
23.3.3 *Black lipid membranes* e interferenza da lamina sottile 978
Esempio 23.5 Il calcolo dello spessore di una lamina d'acqua saponata 979 – Esempio 23.6 L'interferenza da un cuneo d'aria 980 – Esempio 23.7 Calcolo delle condizioni per l'interferenza costruttiva e distruttiva per gli anelli di Newton in riflessione 981

23.4 La polarizzazione della luce 981
23.4.1 La legge di Malus 983
Esempio 23.8 La dimostrazione della legge di Malus 984 – Esempio 23.9 L'intensità del campo elettrico dopo un polarizzatore 984
23.4.2 Polarizzazione per riflessione 985
23.4.3 Polarizzazione per diffusione 986
23.4.4 Birifrangenza e polarizzazione per birifrangenza 987

23.4.5 Polarizzatore circolare 990
23.4.6 Prisma di Wollaston 991
23.4.7 L'occhio degli insetti e di altri animali e la polarizzazione della luce 992

23.5 I coefficienti di Fresnel 994
Esempio 23.10 Calcolo dell'angolo di Brewster 994 – Esempio 23.11 Incidenza quasi normale 994

23.6 La diffrazione 994
23.6.1 Diffrazione da apertura circolare 997
23.6.2 Il reticolo di diffrazione 1000
Esempio 23.12 Il reticolo di diffrazione 1000
23.6.3 *Il monocromatore* 1000
23.6.4 Condizioni di Laue e legge di Bragg 1000
23.6.5 La doppia elica del DNA 1003

23.7 La colorazione strutturata degli animali 1005
23.7.1 La fisica del camaleonte 1006

Esercizi svolti, bibliografia e sitografia del capitolo

Capitolo 24
Gli strumenti ottici 1009

24.1 Gli strumenti ottici e la biologia 1010
24.2 Breve storia del microscopio ottico in biologia e medicina 1011
24.3 La lente d'ingrandimento 1014
24.4 La combinazione di lenti 1015
Esempio 24.1 La combinazione di due lenti convergenti 1016 – Esempio 24.2 La combinazione di una lente convergente con una divergente 1017 – Esempio 24.3 Un fascio di luce parallelo 1018

24.5 Il microscopio ottico composto 1019
24.6 La profondità di campo e di fuoco 1020
24.7 Aberrazioni delle lenti 1021
24.7.1 Aberrazione sferica 1022
24.7.2 Aberrazione cromatica 1023
Esempio 24.4 La lunghezza focale di un sistema di due lenti 1024
24.7.3 La correzione dell'aberrazione cromatica 1026
24.7.4 L'astigmatismo 1028
24.7.5 La coma 1028

24.8 La teoria di Abbe e la risoluzione in microscopia ottica 1030
24.9 Specifiche tecniche di una lente obiettivo 1035
24.10 L'illuminazione in un microscopio ottico 1036
24.11 Il contrasto di fase e di interferenza differenziale in microscopia ottica 1037
24.11.1 Il contrasto di fase 1038
24.11.2 Il contrasto di interferenza differenziale 1040

24.12 La fisica dell'occhio 1042
24.13 Modelli ottici dell'occhio 1044
24.13.1 Le lenti spesse 1045
24.13.2 Il potere rifrangente di una lente spessa e le formule per la determinazione della posizione dei piani principali 1047
24.13.3 La vergenza e il modello dell'occhio 1047
Esempio 24.5 Calcolo della vergenza per un fascio che passa attraverso una combinazione di dispositivi ottici 1047 – Esempio 24.6 Una superficie rifrangente piana trattata con il metodo della vergenza 1047

24.14 Difetti della vista 1047
24.15 Biofisica e fisiologia del sistema visivo 1050
24.15.1 La visione a colori 1051
24.15.2 L'acutezza visiva 1054
Esempio 24.7 La risoluzione dell'occhio umano 1055

24.16 Il microscopio a fluorescenza 1056
24.17 Il microscopio confocale 1057
24.18 La microscopia a super-risoluzione 1058

Esercizi svolti, bibliografia e sitografia del capitolo

Capitolo 25
Introduzione alla meccanica quantistica 1061

25.1 La meccanica quantistica e la biologia
25.2 La radiazione di corpo nero
25.3 L'effetto fotoelettrico e l'effetto Compton
Esempio 25.1 L'effetto fotoelettrico da una superficie di argento – Esempio 25.2 La corrente di fotoelettroni – Esempio 25.3 L'urto tra un fotone e un elettrone

25.4 L'ipotesi di de Broglie: la simmetria tra fotoni e particelle
Esempio 25.4 La lunghezza d'onda associata a un elettrone in moto – Esempio 25.5 La lunghezza d'onda di un elettrone e di un protone

25.5 L'ipotesi di de Broglie e l'atomo di Bohr
25.6 Il dualismo onda corpuscolo per gli elettroni: l'esperimento più bello della fisica
Esempio 25.6 L'esperimento della doppia fenditura in numeri

25.7 Il formalismo delle onde per le particelle e il principio di indeterminazione di Heisenberg
25.8 L'equazione di Schrödinger
25.8.1 La particella libera
25.8.2 La particella in una buca di energia potenziale
25.8.3 Un gradino di energia potenziale di altezza finita
25.8.4 Una buca di energia potenziale di altezza finita
25.8.5 Una barriera di energia potenziale di altezza finita: il microscopio a effetto tunnel
25.8.6 L'oscillatore armonico quantistico

25.9 L'atomo di idrogeno e i numeri quantici
25.10 La meccanica quantistica per la fotosintesi
25.10.1 Breve descrizione del processo di fotosintesi
25.10.2 Gli aspetti quantistici della fotosintesi

25.11 La fisica del nucleo
Nota storica – Rutherford e la scoperta del nucleo atomico
25.11.1 I decadimenti radioattivi
25.11.2 La legge del decadimento radioattivo

Esercizi svolti, bibliografia e sitografia del capitolo

Indice analitico 1063

Prefazione: la fisica e la biologia

Questo libro nasce dall'esperienza di chi ha a lungo insegnato fisica agli studenti dei Corsi di Laurea con orientamento verso le scienze della vita e dal desiderio di offrire un programma di fisica adeguato e di specifico interesse per la loro preparazione. Si potrebbe dunque definirlo un testo di "Fisica per le Scienze della Vita", ma questo non significa che esista una fisica diversa per ciascun ambito specifico delle scienze. La fisica è sempre la stessa. Non esistono leggi della fisica valide solo per la biologia e non per altri contesti scientifici.

La fisica per le Scienze della Vita (SdV) qui proposta è piuttosto un programma specifico volto a enfatizzare gli aspetti di base più rilevanti in un contesto mirato alla comprensione, in termini quantitativi, dei processi biologici. Ove possibile, vengono inizialmente presentati alcuni fenomeni del mondo biologico e successivamente, a partire dall'esempio concreto, si introducono gli aspetti fisici che possono aiutare a descriverli. Questo significa che si insiste su aspetti magari poco comuni in libri di testo collocati fuori dal contesto specifico delle SdV, mentre su alcuni argomenti di fisica di base ci si limita necessariamente a una più sintetica trattazione, ricordando i concetti fondamentali e utili alla comprensione degli argomenti successivi, senza fornire approfondimenti troppo specialistici. Ciò non esclude la rigorosità della trattazione e il desiderio di fornire un manuale completo, con la speranza che possa tornare utile anche per future consultazioni nel prosieguo della propria formazione o del proprio lavoro.

Il libro nasce come specifica opera dedicata agli studenti di SdV, non è quindi l'adeguamento di un testo generico destinato a generici studenti delle lauree triennali. Confrontandosi con quanto avviene a livello internazionale, il contenuto di quest'opera segue in parte le indicazioni emerse dal progetto *Bio2010 – Transforming Undergraduate Education for Future Research Biologists,* volto a riformare l'insegnamento destinato agli studenti delle SdV in vista delle attuali esigenze. In tale resoconto, per i corsi di base quali Matematica, Fisica e Chimica, vengono presi in esame i contenuti specifici che risultano più adeguati, e anche più stimolanti, per la preparazione scientifica di questi studenti.

La motivazione per l'esistenza di un corso di Fisica, come di Matematica, in un percorso di studio orientato ai sistemi biologici è rappresentata in genere dall'acquisizione di un metodo di ragionamento scientifico. Anche se vera, al giorno d'oggi questa motivazione non è sufficiente per convincere gli studenti della "necessità" della fisica. È auspicabile che essi trovino in tale corso gli strumenti utili alla comprensione dei problemi che più li interessano. Sono concetti teorici all'interno dei quali inquadrare alcuni fenomeni biologici, e concetti più applicativi utili a comprendere le tecniche sperimentali che molto probabilmente gli studenti si troveranno a utilizzare. Molte tecniche di analisi biochimiche, così come quelle di microscopia e spettroscopia, si basano, infatti, su leggi della fisica. Questo testo avrà raggiunto il suo scopo se gli studenti di SdV comprenderanno l'importanza della conoscenza della fisica nella lettura dei fenomeni naturali e anche come sia la stessa biologia a porre problemi di estrema rilevanza da affrontare con gli strumenti tipici della fisica.

Nell'opera si farà spesso una breve digressione storica relativa ai concetti trattati: riflettere su come determinati risultati siano stati ottenuti nel tempo, è infatti utile per meglio comprendere ciò che è solo il frutto di una convenzione e ciò che emerge come conseguenza di particolari comportamenti della natura, e per illustrare il modo di procedere della scienza.

Aspetti innovativi del manuale

Ci sono aspetti che rendono la barriera tra fisica e biologia apparentemente insormontabile. Mentre la fisica cerca sempre di procedere verso la semplificazione e l'unificazione, andando alla ricerca quantitativa dei principi di base che determinano l'evoluzione dei fenomeni, la biologia è concentrata sulla diversità dei fenomeni e sulla descrizione, anche talvolta qualitativa, di processi complicati. In quest'opera si cerca di superare tale barriera concentrandosi su temi che possono essere affrontati con un approccio multidisciplinare tra biologia e fisica.

Il primo aspetto riguarda l'uso della matematica. È convinzione diffusa che la biologia del futuro si baserà sempre di più sull'utilizzo di metodi matematici, pertanto bisogna restringere il divario tra l'attuale preparazione matematica di uno studente di area biologica e quanto richiesto. Per esempio, le equazioni differenziali sono utilizzate in diversi ambiti e, in casi opportuni, viene messo in evidenza come fenomeni apparentemente diversi possano essere trattati con un formalismo matematico molto simile. Il caso più rappresentativo è costituito dai fenomeni di trasporto. La

 © 978-88-08-92045-4

diffusione, l'osmosi, la corrente elettrica, il trasporto di calore e i fenomeni viscosi in un fluido possono tutti essere descritti da equazioni simili.

A livello di contenuto sono diversi gli aspetti di specifica rilevanza biologica proposti nel libro. Di seguito viene riportato un elenco di quelli più significativi.

- Fenomeni tipicamente meccanici, come il comportamento elastico di una molla, vengono presentati con le loro implicazioni di rilevanza biologica. Per esempio, il modello a molla è molto utile per descrivere un legame chimico e per comprendere quindi l'interazione con un'onda elettromagnetica e alcune spettroscopie.
- Un tema sempre ricorrente è quello dei fenomeni stocastici dominati dal "rumore" e particolarmente rilevanti alla scala molecolare. Uno specifico capitolo (Capitolo 13, *La meccanica statistica*) è dedicato ai fenomeni legati alle fluttuazioni, mentre il moto Browniano, che caratterizza il mondo a livello molecolare, viene introdotto nel Capitolo 15, *Random walk e diffusione*.
- Sono analizzati approfonditamente la dinamica dei fluidi e i fenomeni di tensione superficiale (a questi ultimi viene dedicato l'intero Capitolo 9). Nel contesto dei fluidi si evidenzia il fatto che i sistemi biologici microscopici si muovono in un ambiente acquoso in cui domina la dissipazione rispetto all'inerzia.
- Ampio spazio è dedicato allo studio delle proprietà reologiche dei materiali e a come possono essere descritte e misurate. I concetti sottostanti possono essere considerati alla base dell'ingegneria biomedica e rispecchiano la notevole rilevanza data negli ultimi anni agli aspetti meccanici dei tessuti biologici (Capitolo14).
- Viene approfondito il concetto di dipolo elettrico a livello molecolare, con la conseguente interazione molecolare generata da un complesso di forze come quelle di van der Waals. Al tempo stesso, la rilevanza di tali forze nel mondo biologico deve essere considerata in un ambiente acquoso. L'intero Capitolo 18 è quindi dedicato allo studio del campo elettrico in soluzione.
- I circuiti elettrici sono poi analizzati nel contesto della propagazione dei segnali elettrici nelle cellule. Ci si addentra nel fenomeno della propagazione del potenziale d'azione con l'introduzione dell'equazione del cavo. Quest'ultimo rappresenta uno dei migliori paradigmi della stretta relazione tra biologia e fisica.
- L'ottica rappresenta un argomento al quale vengono dedicati tre capitoli (Capitoli 22, 23 e 24). In questo caso si insiste sul principio di funzionamento della microscopia ottica mediante le tecniche specifiche utilizzate per i campioni biologici, quali il contrasto di fase e il contrasto di interferenza differenziale.
- Infine, sono presentati i principi di base della meccanica quantistica con la finalità di considerare alcuni fenomeni biologici in cui essi si manifestano. Il processo scelto come esempio della loro applicazione è quello della fotosintesi.

Struttura dei capitoli

Ogni capitolo inizia con una **descrizione generale** degli argomenti che evidenzia gli aspetti più rilevanti in area biologica, e molto spesso, con un inquadramento storico. Segue la trattazione specifica, suddivisa in paragrafi con diversi livelli di approfondimento a seconda della complessità. Per facilitare la comprensione di quanto illustrato, numerosi **Esempi** propongono esercizi numerici, con soluzione commentata, o approfondimenti su aspetti specifici.

Lungo il testo **Note storiche** illustrano, non in maniera esclusivamente aneddotica, alcuni esperimenti eseguiti dai protagonisti della scienza del passato e relativi all'argomento che si sta trattando.

Per ogni capitolo, sono disponibili online una ricca bibliografia e link a risorse multimediali, nonché numerosi **Esercizi svolti**.

La realtà aumentata

Un'altra caratteristica che contraddistingue il volume è la realtà aumentata. Una modalità che permette al lettore di accedere a tutte le risorse online in modo diretto, contestuale e veloce tramite l'uso dello smartphone e dell'applicazione **GUARDA!** È sufficiente inquadrare il marker posizionato in corrispondenza dei contenuti da approfondire per riceverli direttamente sul proprio dispositivo (sono oltre 100 marker disseminati lungo i capitoli del libro). Se si desidera provarne il funzionamento, è sufficiente seguire le semplici istruzioni reperibili nella prima pagina del libro e inquadrare il marker riportato qui sotto: potrete ricevere così ulteriori informazioni. In alternativa è possibile visitare il sito del volume.

Andrea Alessandrini

CAPITOLO

1 Gli strumenti matematici per la fisica

 © 978-88-08-92045-4

Esercizi svolti
Bibliografia
Sitografia

Gli strumenti del mestiere

Esiste una sorta di *irragionevole* efficacia della matematica per la descrizione dei fenomeni naturali. Una legge fisica non può prescindere dalla sua formulazione in termini matematici e le opere che gettano le basi della fisica come la conosciamo oggi sono state scritte e fondate su basi matematiche.

Galileo Galilei e la sua opera più importante per la fisica: *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche intorno a due nuove scienze*.

Et harum scientiarum porta et clavis est Mathematica
(E di queste scienze la Matematica è la porta e la chiave [riferendosi alla matematica, all'ottica, alla scienza sperimentale e alla morale])

Specula Mathematica
Ruggero Bacone

[il grandissimo libro della Natura] che continuamente ci sta aperto innanzi agli occhi (io dico l'universo) [...] è scritto in lingua matematica, e i caratteri sono triangoli, cerchi e altre figure geometriche

Il Saggiatore
Galileo Galilei

1.1 Che rapporto esiste tra fisica e matematica? E tra matematica e biologia?

Le tecniche matematiche sono fondamentali per lo studio della fisica e in generale per una conoscenza quantitativa della natura e questo capitolo vuole dimostralo, perseguendo un duplice scopo. Da una parte si vogliono richiamare i principali strumenti matematici la cui conoscenza è indispensabile per una comprensione completa della fisica, ma dall'altra parte si cerca anche di far comprendere il vero significato dell'utilizzo della matematica nella formulazione di una **legge di natura**. In quest'ultimo senso aiuta una breve analisi storica (▶Nota storica) riguardante lo sviluppo dell'idea di *legge* di natura per rendersi conto di quella che viene anche definita come *l'irragionevole efficacia della matematica nelle scienze naturali*[1].

Essendo quest'opera dedicata alla fisica di interesse per le scienze della vita è importante descrivere anche il rapporto tra matematica e biologia e considerare alcune opinioni al riguardo da parte di illustri esponenti delle scienze

[1] La frase si riferisce al titolo di un lavoro del 1960 del matematico Eugene Wigner, The unreasonable effectiveness of mathematics in the natural sciences, *Communications in Pure and Applied Mathematics* 13 (1960). Il contenuto di tale articolo verrà più volte richiamato nel presente capitolo.

1.2.3 L'unità di misura del tempo

Abbiamo già visto che la scelta più ovvia per l'unità di misura del tempo consisteva nell'utilizzo di fenomeni periodici naturali come la durata del giorno medio o la durata della rivoluzione della Terra attorno al Sole. Attualmente l'unità di misura del tempo, il **secondo**, viene definito sfruttando un fenomeno atomico. Esso è infatti l'intervallo di tempo pari a 9 192 631 770 periodi di particolari onde elettromagnetiche emesse dall'atomo di Cesio 133 (nello specifico si tratta di onde elettromagnetiche prodotte dalla transizione tra due livelli iperfini del Cesio 133, cioè livelli energetici separati da un'energia estremamente ridotta e dovuti alle interazioni magnetiche e di quadrupolo tra il nucleo e gli elettroni).

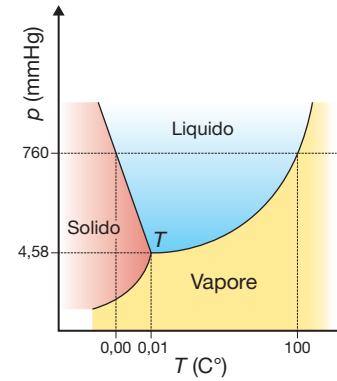


Figura 1.1 • Diagramma di fase dell'acqua in cui vengono definite le condizioni per il punto triplo *T*.

1.2.4 L'unità di misura della temperatura

Per la temperatura l'unità di misura del SI è il **Kelvin** e viene definita come la frazione 1/273,16 della temperatura termodinamica del punto triplo dell'acqua. Il punto triplo dell'acqua rappresenta quella situazione, identificata da un'unica temperatura e pressione, alla quale l'acqua è presente contemporaneamente nelle tre fasi liquido, solido e vapore, come mostrato nel diagramma di fase riportato nella **Figura 1.1**. Il Kelvin viene indicato con il simbolo K e la temperatura espressa nella scala Kelvin viene indicata come **temperatura assoluta**. Impareremo con lo studio della termodinamica che la scala assoluta è tale per cui lo zero della scala Kelvin, detto anche zero assoluto, corrisponde al limite inferiore della temperatura teorica che si potrebbe raggiungere, estrapolata dalle equazioni di stato dei gas.

L'unità di misura della temperatura che viene principalmente utilizzata in Europa a livello sociale è il **grado Centigrado**, indicato con il simbolo °C. Esso rappresenta la centesima parte dell'intervallo di temperatura compreso tra la condizione di congelamento ed ebollizione dell'acqua alla pressione di 1 atmosfera (760 mmHg). Alle due condizioni (acqua in equilibrio con ghiaccio fuso e acqua in equilibrio con il vapore) vengono associate le temperature di 0 °C e 100 °C. È importante considerare che la temperatura che corrisponde al punto triplo dell'acqua è 0,01 °C. La conversione tra scala Kelvin e gradi Centigradi è quindi data da:

$$\text{Temperatura (Kelvin)} = t \text{ (gradi Centigradi)} + 273{,}15.$$

Nel mondo anglosassone viene utilizzata a livello sociale una scala di temperatura definita di Fahrenheit, la quale divide in 180 parti l'intervallo di temperatura tra il congelamento dell'acqua (al quale viene associato il valore di 32 °F e la temperatura di ebollizione dell'acqua (alla quale viene dato il valore di 212 °F). La conversione tra temperatura Fahrenheit e Kelvin è quindi data da:

$$\text{Temperatura (Kelvin)} = \frac{5}{9}t \text{ (gradi Fahrenheit)} + 255{,}37.$$

1.2.5 L'unità di misura della corrente elettrica

L'unità di misura della corrente elettrica, definita **Ampère** (simbolo A), fa parte dell'insieme delle unità fondamentali del SI, a differenza dell'unità di misura della carica elettrica, il Coulomb, la quale è un'unità di misura derivata. La corrente di 1 Ampère rappresenta quella corrente che deve passare in due fili paralleli di lunghezza infinita e sezione circolare trascurabile che, posti a una distanza di 1 metro tra loro, fa sì che si stabilisca una forza pari a $2 \cdot 10^{-7}$ Newton per ogni metro di lunghezza (Capitolo 19).

Vedi **Capitolo 19**
Il campo magnetico

 © 978-88-08-92045-4

1.2.6 L'unità di misura dell'intensità luminosa

La **candela** (simbolo cd) rappresenta l'unità di misura dell'intensità luminosa. Essa rappresenta l'intensità luminosa, in una data direzione, di una sorgente che emette una radiazione alla specifica frequenza di $540 \cdot 10^{12}$ Hz e la cui intensità energetica, nella stessa direzione, corrisponde a 1/683 Watt allo steradiante. Nel ▶paragrafo 1.5 introdurremo il radiante e specificheremo anche cosa si intende per steradiante, passando dalla situazione bidimensionale di una circonferenza alla situazione in tre dimensioni di una sfera.

1.2.7 L'unità di misura della quantità di sostanza

L'ultima unità di misura che introduciamo tra quelle fondamentali del SI è la **mole**, il cui simbolo è mol. La mole è la quantità di sostanza di un sistema che contiene un numero di unità elementari uguale al numero di atomi in 0,012 kg dell'isotopo $^{12}_{6}C$ del Carbonio. A sua volta, il numero di unità elementari contenuto in una mole prende il nome di **numero di Avogadro** N_A e numericamente è dato da:

$$N_A = 6{,}022 \cdot 10^{23}\ \text{mol}^{-1}.$$

Si noti che il numero di Avogadro ha quindi una sua dimensione, cioè mol^{-1}. Infatti, vale la seguente relazione per indicare il numero di moli n in una sostanza:

$$n = \frac{N\ (\text{numero di entità elementari})}{N_A}$$

ottenendo quindi un valore di n espresso in moli.

Esempio 1.1

La scala delle dimensioni in biologia

La **Figura 1.2** mostra la scala delle dimensioni spaziali delle più importanti strutture biologiche. Si può vedere come una cellula sia estremamente più grande di una singola molecola, come quella dell'acqua. A scale di distanza ancora più piccole, circa 10^{-15} m, troviamo il diametro di un singolo protone. La scala riporta anche dove si posiziona la risoluzione di un microscopio ottico (circa 200 nm), evidenziando come la maggior parte dei costituenti elementari delle strutture biologiche non siano osservabili con tale microscopio. Per superare tale limite sono state sviluppate tecniche quali la microscopia a super-risoluzione basata sulla fluorescenza o le microscopie a scansione di sonda.

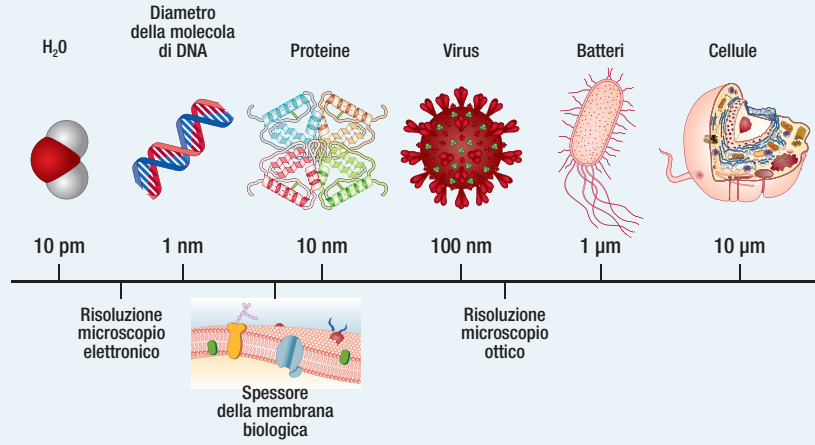


Figura 1.2 • Scala delle dimensioni in in biologia: dalle molecole semplici alla cellula.

1.4 I vettori e i sistemi di riferimento

Esistono in fisica alcune grandezze per le quali, una volta definito il loro valore numerico con relativa unità di misura, conosciamo tutto. Una volta che specifichiamo il valore numerico di una massa, fornendo anche l'unità di misura, oppure di una temperatura, per esempio in gradi centigradi, conosciamo completamente tali grandezze. In questo caso le grandezze fisiche considerate si definiscono **grandezze scalari**.

Esistono però altre grandezze fisiche, come la velocità o la forza, per definire le quali è necessario specificare l'entità con un numero associato a un'unità di misura (tale numero viene definito anche *modulo*), una direzione lungo la quale agiscono (la direzione della velocità o di azione della forza) e il verso (cioè il verso positivo o negativo, stabilito per convenzione, lungo la retta d'azione). In questo caso le grandezze fisiche vengono definite **vettoriali**[6].

Queste ultime grandezze vengono quindi rappresentate con dei vettori, ovvero delle rappresentazioni geometriche (matematiche) di grandezze fisiche mediante frecce. La lunghezza della freccia rappresenta il modulo della grandezza, mentre il modo in cui è orientata la direzione e il verso, come mostrato nella **Figura 1.4a**. Se un vettore viene traslato tenendolo sempre parallelo a sé stesso, abbiamo sempre lo stesso vettore. I vettori non hanno cioè una posizione specifica. Quindi, i due vettori mostrati nella **Figura 1.4b** rappresentano lo stesso vettore.

In quest'opera i vettori vengono indicati scrivendo il simbolo della grandezza in grassetto, mentre le grandezze scalari vengono indicate con il carattere corsivo. Per esempio, il vettore velocità viene indicato con il simbolo $\mathbf{v}$ e la rappresentazione con il carattere corsivo farà riferimento al modulo, rappresentato anche con il simbolo di valore assoluto: $v = |\mathbf{v}|$.

Possiamo a questo punto definire le operazioni che possono essere effettuate sui vettori.

1.4.1 La somma di vettori

Consideriamo due vettori **A** e **B** come mostrato nella **Figura 1.5a**. Definiamo il vettore **C** come somma dei vettori **A** e **B** attraverso le seguenti possibili costruzioni geometriche.

1. Il vettore **B** viene traslato parallelamente a sé stesso fino a portare la coda della freccia di **B** a coincidere con la punta della freccia di **A**. La freccia che

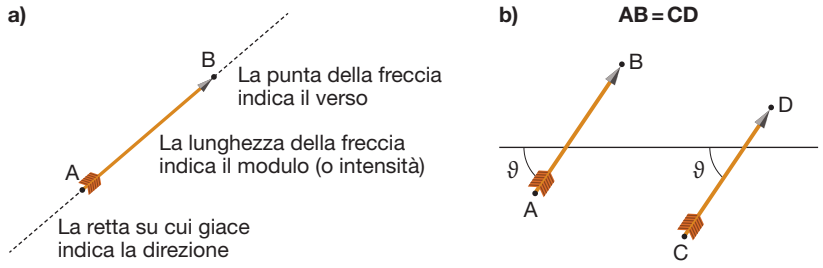


Figura 1.4 • **(a)** Rappresentazione grafica di un vettore. **(b)** I due vettori **AB** e **CD** sono due rappresentazioni dello stesso vettore. Si passa da uno all'altro traslando uno dei due vettori mantenendo costante l'angolo ϑ formato dal vettore con una retta (definizione di parallelismo tra i due vettori).

[6] Si tenga presente che nel mondo anglosassone le grandezze vettoriali vengono definite dal modulo e dalla direzione. Non viene cioè specificato il verso del vettore, ma esso è già incluso nella direzione.

 © 978-88-08-92045-4

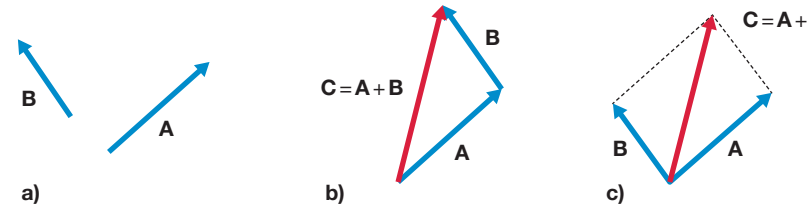


Figura 1.5 • **(b)** Viene qui mostrato il metodo di somma dei due vettori riportati in **(a)**, definito metodo *punta-coda*. **(c)** È mostrato il metodo di somma del *parallelogramma*.

parte dalla coda di **A** e arriva sulla punta di **B** rappresenta il vettore $\mathbf{C} = \mathbf{A} + \mathbf{B}$ (**Figura 1.5b**).

2. Si trasli il vettore **B** mantenendolo parallelo a sé stesso fino a far coincidere le code dei due vettori. I due vettori rappresentano i lati di un parallelogramma la cui diagonale è il vettore $\mathbf{C} = \mathbf{A} + \mathbf{B}$ (**Figura 1.5c**).

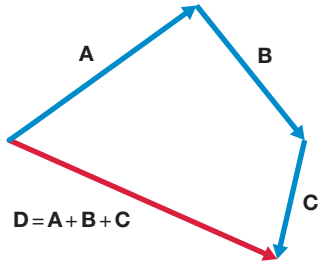


Figura 1.6 • Somma di tre o più vettori con il metodo punta - coda.

Dato che la somma di due vettori è di nuovo un vettore, possiamo definire la somma di più vettori. In questo caso il primo dei due procedimenti geometrici di somma è più facilmente generalizzabile a più vettori, come mostrato nella **Figura 1.6**.

Per la somma di vettori valgono la proprietà commutativa:

$$\mathbf{A} + \mathbf{B} = \mathbf{B} + \mathbf{A}$$

e la proprietà associativa:

$$(\mathbf{A} + \mathbf{B}) + \mathbf{C} = \mathbf{A} + (\mathbf{B} + \mathbf{C}).$$

1.4.2 La moltiplicazione di un vettore per uno scalare

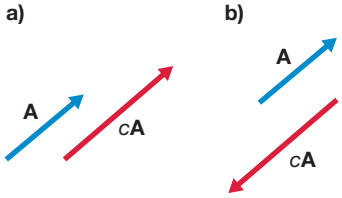


Figura 1.7 • **(a)** Prodotto tra uno scalare positivo *c* e il vettore **A**. **(b)** Prodotto tra uno scalare *c* negativo e il vettore **A**.

Sia *c* uno scalare positivo. Il prodotto dello scalare *c* con il vettore **A** è definito come il vettore avente stessa direzione e verso del vettore **A** e modulo dato dal prodotto tra *c* e il modulo di **A**:

$$|c\mathbf{A}| = c|\mathbf{A}|$$

come mostrato nella **Figura 1.7a**. Se lo scalare *c* è invece un numero negativo, il prodotto con il vettore **A** restituisce un vettore con il modulo definito come:

$$|c\mathbf{A}| = -c|\mathbf{A}|$$

con la stessa direzione del vettore **A** ma verso opposto, come mostrato nella **Figura 1.7b**.

La definizione di tale operazione di prodotto per uno scalare ci consente di determinare l'opposto del vettore **A**. Esso si ottiene moltiplicando il vettore stesso per – 1. Possiamo quindi definire l'operazione di sottrazione tra vettori. Infatti, l'operazione di sottrazione tra i vettori $\mathbf{A} - \mathbf{B}$ può essere intesa come la somma tra il vettore **A** e il vettore $-\mathbf{B}$, come mostrato nella **Figura 1.8**.

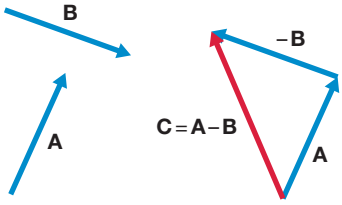


Figura 1.8 • Operazione di differenza tra due vettori. Tale operazione viene ricondotta alla somma del primo vettore con l'opposto del secondo.

1.4.3 I sistemi di riferimento

In fisica, la posizione di un oggetto nello spazio è sempre definita rispetto ad almeno un altro oggetto. La scelta è quindi quella di una descrizione relativistica e non assoluta della posizione degli oggetti. Per descrivere un processo fisico nello spazio è necessario allora avere un riferimento. Definiamo un insieme di assi e un'origine che verranno utilizzati per descrivere la posizione

Chiaramente, la definizione è indipendente dal valore di R.

Nella **Tabella 1.4** sono riportati i valori delle funzioni seno, coseno e tangente per alcuni valori caratteristici dell'angolo espresso sia in gradi sia in radianti.

La **Tabella 1.5** riporta le formule di addizione per poter scrivere in modo alternativo il coseno e il seno della somma e differenza di due angoli.

La **Tabella 1.6** riporta le formule per esprimere il seno, il coseno e la tangente del doppio di un angolo in termini delle funzioni seno, coseno e tangente dell'angolo stesso.

La **Tabella 1.7** riporta le formule di bisezione per poter esprimere il seno, il coseno e la tangente della metà di un angolo in termini delle funzioni seno, coseno e tangente dell'angolo stesso.

La **Tabella 1.8** mostra come si possano esprimere, attraverso quelle che vengono definite formule di prostaferesi, la somma e la differenza delle funzioni seno e coseno di due angoli.

TABELLE 1.4–1.8 Formule trigonometriche

1.6 Il calcolo: la derivata e l'integrale

L'aspetto matematico di maggior rilievo nell'ambito fisico è senza dubbio la trattazione del calcolo e degli strumenti a esso associati. Con il termine *calcolo* si fa riferimento agli strumenti algoritmici che consentono di affrontare i problemi legati ai processi matematici di integrazione e derivazione. Una premessa valida per tutta la trattazione matematica inserita nella presente opera è relativa al grado di rigore formale richiesto. Se ci volgiamo indietro e proviamo ad analizzare l'opera di Newton e di Leibniz, i cui nomi sono strettamente associati all'invenzione del calcolo, ci rendiamo subito conto che l'applicazione degli strumenti matematici è in loro non saldamente supportata dal rigore matematico formale che tali strumenti ricevettero solo in seguito. L'uso di tali strumenti è in loro legato soprattutto all'intuizione fisica. In personaggi di tale livello l'intuizione svincolata dal rigore formale non è comunque esposta al rischio di allontanarsi troppo dal giusto sentiero. È comunque certo che la matematica di Newton verrebbe attualmente respinta se fosse passata al setaccio del rigore formale che era stato richiesto dalla matematica dei Greci e che è ora richiesto dalla matematica moderna. Ciò significa principalmente che talvolta l'intuizione fisica può avvalersi di nuovi strumenti matematici, anche se a questi non è stata fornita una veste di giustificazione formale rigorosa.

Il calcolo è quindi legato ai nomi di due figure fondamentali per la fisica del XVIII secolo: Newton e Leibniz. Molto si è scritto sulla questione della priorità dell'invenzione del calcolo. La visione più accettata è che dal punto di vista cronologico Newton giunse prima di Leibniz a tale invenzione, ma Leibniz ci giunse comunque in modo autonomo. Ciò testimonia comunque del clima ormai saturo delle nuove idee che ha inevitabilmente portato agli stessi punti di condensazione indipendentemente, anche se non contemporaneamente. Nel seguito verranno illustrati i due procedimenti connessi al calcolo.

Prima di considerare il concetto di derivata, analizziamo il concetto di limite di una funzione $f(x)$ quando x tende a un valore particolare x_0. Il limite per x tendente a x_0 della funzione $f(x)$ rappresenta il valore a cui tende la funzione quando x si avvicina sempre più a x_0. La notazione matematica per tale limite è la seguente:

$$\lim_{x \to x_0} f(x).$$

CAPITOLO

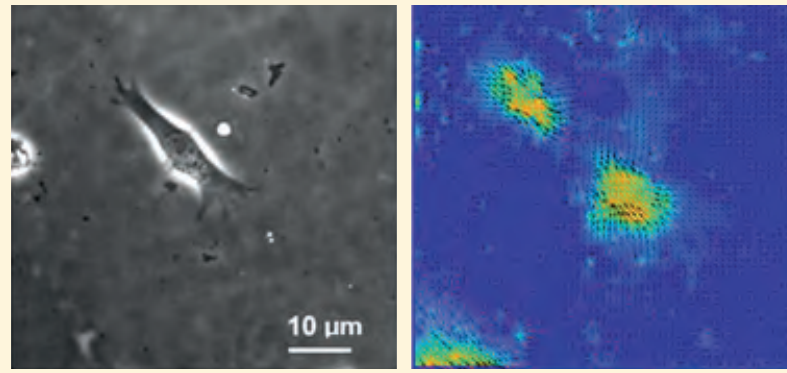
2 La meccanica

© 978-88-08-92045-4

Esercizi svolti
Bibliografia
Sitografia

Le cellule e le forze

Le cellule applicano continuamente forze sull'ambiente in cui si trovano. La risposta meccanica dell'ambiente determina diverse reazioni biochimiche che influenzano il comportamento della cellula stessa. Gli aspetti meccanici sono quindi determinanti per la comprensione dei sistemi biologici e la nuova scienza della meccanobiologia si occupa di questi processi.



Una cellula su un substrato osservata in contrasto di fase (a sinistra) e le forze esercitate dalla stessa cellula sul substrato mostrate in una scala di falsi colori (a destra).

2.1 L'importanza della meccanica

Una delle domande più frequenti che lo studente di Scienze della vita si pone nel momento in cui inizia a studiare la parte del programma di fisica riguardante la meccanica è se tale sezione possa essere effettivamente rilevante per i sistemi che saranno poi gli oggetti prevalenti dei suoi studi. Si è soliti pensare che altre sezioni del programma di fisica di base, per esempio l'elettrostatica e l'ottica, siano più utili per la comprensione del funzionamento dei sistemi biologici o degli strumenti utilizzati per indagarli. A parte lo studio della statica del sistema scheletrico, in cui i concetti di forza applicata, momenti delle forze e reazione del vincolo sono da sempre utilizzati, anche dal punto di vista più fondamentale e soprattutto a livello cellulare (a sua volta determinato dalla struttura delle proteine) è emersa negli ultimi anni la grande rilevanza che le **forze meccaniche**, principale oggetto di studio della meccanica, hanno per i sistemi biologici. Le singole cellule sono dotate di specifiche proprietà meccaniche rivelatrici del loro stato fisiologico o patologico e interagiscono con l'ambiente esterno attraverso forze meccaniche. Da queste interazioni con il mondo esterno, spesso dovute a quelle che si possono considerare piccole unità sarcomeriche, hanno origine risposte specifiche che vengono tradotte in reazioni biochimiche. È nato quindi un settore di studio conosciuto come **meccanobiologia** in cui viene studiata la trasduzione dei segnali meccanici in segnali biochimici, oltre a quali possano essere i circuiti di retroazione connessi. Essa richiede conoscenze altamente interdisciplinari comprendenti la fisica, la biologia e la chimica. Oltre a questa giustificazione, occorre considerare che la meccanica rappresenta anche il prototipo di teoria fisica, il cui studio ha quindi un valore metodologico.

nervosi, nello specifico il potenziale d'azione all'interno degli assoni, e la velocità con cui si muove una cellula. Gli argomenti saranno nuovamente trattati nei Capitoli 15 e 18 allorché prenderemo in considerazione gli aspetti legati al rumore termico e al moto Browniano e i fenomeni elettrici nelle cellule.

Vedi **Capitolo 15**
Random walk e diffusione

Vedi **Capitolo 18**
Il campo elettrico in soluzione e l'elettricità nei sistemi biologici

2.7.1 La velocità dei motori molecolari

Utilizzando la reazione di idrolisi dell'ATP (ATP → ADP + P) alcune proteine all'interno della cellula sono in grado di spostarsi lungo quelle che si possono considerare delle autostrade della cellula. Queste proteine sono dei nanomotori che trasformano l'energia chimica derivata dall'ATP in energia meccanica per realizzare uno spostamento. Alcune di queste proteine possono poi trascinare con sé dei carichi e assicurare quindi il trasporto di molecole da una parte all'altra della cellula sopperendo al meccanismo di trasporto basato sulla sola diffusione (Capitolo 15). Infatti quest'ultimo avrebbe in alcuni casi, specialmente all'aumentare delle distanze, scale di tempi incompatibili con le normali funzioni di una cellula. Altri motori molecolari assicurano invece altre fondamentali funzioni della cellula quali la divisione e la migrazione.

Esistono due tipi di autostrade principali in una cellula e tre diversi tipi di motori molecolari che transitano su di esse. Le autostrade sono costituite dai polimeri del citoscheletro cellulare e in particolare dai filamenti di actina e dai microtubuli. Sui primi il motore molecolare che transita è la miosina (esistono numerosi tipi diversi di miosina), mentre sui secondi circolano le chinesine nel verso dal centro della cellula all'esterno e le dineine dall'esterno verso il centro della cellula.

Esistono due meccanismi che i motori molecolari sfruttano per lo scorrimento sul citoscheletro.

1. **Motori processivi**: in questo caso il motore molecolare rimane attaccato al filamento citoscheletrico durante tutto il ciclo di funzionamento del motore. Il motore deve avere almeno due teste che si possono agganciare al filamento e deve eseguire uno spostamento analogo a quello di un marciatore che non deve mai staccare contemporaneamente entrambi i piedi dal suolo.
2. **Motori non-processivi**: la testa del motore rimane agganciata al filamento di citoscheletro per una piccola frazione del suo ciclo complessivo. In questo caso può essere sufficiente anche una sola testa e l'avanzamento complessivo per un ciclo è dato da una parte di avanzamento quando è in contatto e una parte di avanzamento, generalmente dominante, quando non è in contatto.

La **Figura 2.28** mostra il diagramma posizione in funzione del tempo (trattandosi di un moto lungo un filamento/polimero, il moto si può assimilare al caso unidimensionale semplificando notevolmente la trattazione). Nel caso specifico, si tratta di una molecola di miosina V che si muove con passi discreti di lunghezza costante su un filamento di actina immobilizzato su un vetrino. La velocità di spostamento è quantificabile in circa 800-900 nm/min. Le velocità tipiche di spostamento dei motori molecolari variano da 10^{-2} a 1 μm/s.

Il motore molecolare mostrato nella Figura 2.28 è di tipo processivo e la sua velocità di movimento è vincolata alla velocità con cui riesce a consumare l'ATP per lo spostamento (una singola molecola di ATP è richiesta per un ciclo completo del motore).

Nel ▶paragrafo 15.12 verranno descritti i meccanismi meccanochimici che permettono di ottenere spostamenti a partire da variazioni conformazionali delle molecole in un ambiente dominato dal rumore termico.

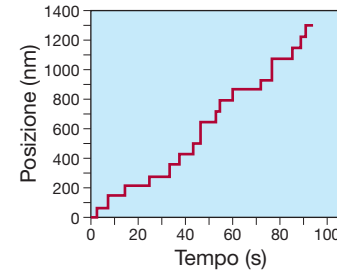


Figura 2.28 • Grafico della posizione in funzione del tempo per il moto unidimensionale del motore molecolare miosina V che si muove su un filamento di actina.

 © 978-88-08-92045-4

2.7.2 La velocità dei segnali nervosi

Vedi **Capitolo 18**
Il campo elettrico in soluzione e l'elettricità nei sistemi biologici

Il fenomeno della propagazione dei segnali nervosi nelle cellule rappresenta sicuramente uno degli esempi più significativi della relazione tra fisica e biologia. Sin dagli esperimenti di Luigi Galvani, il quale dimostrò che era possibile indurre una contrazione dei muscoli di una rana morta tramite stimoli elettrici, venne messo in evidenza come ci fosse una stretta correlazione tra fenomeni elettrici e la propagazione dei segnali nervosi. Nel Capitolo 18 tratteremo in dettaglio gli aspetti molecolari ed elettrici connessi alla propagazione del potenziale d'azione, mentre in questo contesto ci concentreremo sulla velocità con cui questo segnale viaggia nelle cellule.

Il primo a trovare un valore quantitativo per la velocità di propagazione dei segnali nervosi è stato Hermann von Helmholtz, il quale trovò un ritardo di tempo tra la stimolazione elettrica di un nervo e la contrazione di un muscolo. Misurando la distanza tra la regione dello stimolo e il muscolo, Helmholtz calcolò una velocità pari a circa 30 m/s (in particolare, il valore da lui ottenuto era compreso tra 25 e 43 m/s). Il sistema sperimentale da lui utilizzato era derivato dalla strumentazione scientifica utilizzata nel contesto militare per la determinazione della velocità dei proiettili. La strumentazione si basava sull'apertura e chiusura di un circuito elettrico secondo uno schema introdotto dal fisico francese Pouillet[5]. Uno schema del dispositivo utilizzato da Helmholtz è riportato nella **Figura 2.29**. Gli esperimenti di Helmholtz sulla propagazione dei

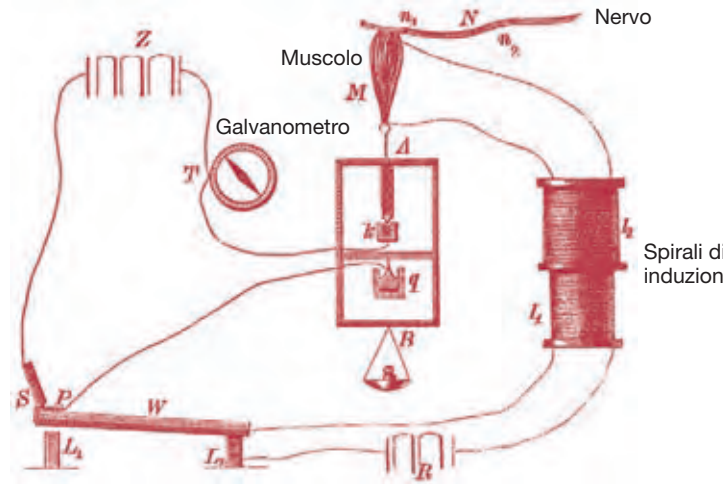


Figura 2.29 • Schema del dispositivo utilizzato da Helmoltz per misurare la velocità di propagazione dei segnali nervosi. Due circuiti vengono alimentati contemporaneamente dalla chiusura dello stesso interruttore (S-P). Il contatto posizionato in diversi punti del nervo (n_1, n_2) permette di ottenere diverse lunghezze necessarie affinché la propagazione del segnale nervoso produca la contrazione del muscolo. Quando il muscolo si contrae, viene interrotto il circuito collegato al galvanometro. Con il metodo di Pouillet è quindi possibile misurare la velocità di propagazione del segnale nervoso.

[5] Il metodo introdotto da Pouillet si basa sul fatto che la deflessione dell'ago di un galvanometro dipende non solo dall'intensità della corrente ma anche dal tempo durante il quale la corrente fluisce. Pouillet introdusse un circuito elettrico in grado di produrre stimoli di corrente costante di durata controllata tramite un disco rotante su cui erano posizionati contatti di lunghezza stabilita. Mantenendo la corrente costante, la deflessione dell'ago del galvanometro poteva essere utilizzata per misurare la durata dell'impulso.

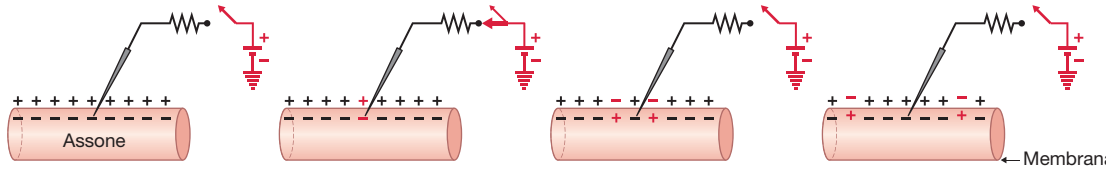


Figura 2.30 • Producendo un'inversione della differenza di potenziale al di sopra di un valore soglia, questa si propaga lungo i due versi dell'assone.

segnali nervosi costituiscono l'inizio di quella branca della scienza che riguarda la fisica dei nervi e dei muscoli e che venne in seguito chiamata **neurofisiologia**.

Come mostrato schematicamente nella **Figura 2.30**, se uno stimolo elettrico che altera la differenza di potenziale tra l'interno e l'esterno della membrana di un assone è sufficientemente elevato, si produce un segnale di inversione del potenziale che si propaga lungo l'assone (riconsidereremo questo meccanismo in dettaglio nel Capitolo 18).

Vedi **Capitolo 18**
Il campo elettrico in soluzione e l'elettricità nei sistemi biologici

Il valore attualmente conosciuto per la velocità di propagazione dei segnali nervosi è dello stesso ordine di grandezza di quello misurato da Helmholtz ma esiste una grande variabilità a seconda del particolare segnale considerato. Si può andare da stimoli che viaggiano a 100 m/s fino a stimoli molto più lenti, i quali viaggiano a 0,10 m/s. La differenza è molto spesso dovuta ad alcune caratteristiche della membrana cellulare in cui ha sede il processo di propagazione del segnale. Dal punto di vista elettrico, impareremo nel Capitolo 18 che un elemento circuitale come un condensatore cambia la carica sui suoi elettrodi con una velocità caratteristica dipendente dalla capacità elettrica e dalla resistenza elettrica, che, nel caso di una membrana, è analoga alla sua permeabilità. Al tempo stesso, il potenziale elettrico della membrana in un punto influenza il potenziale della membrana in punti prossimi a quello considerato, attraverso una lunghezza caratteristica. Questa lunghezza caratteristica dipende dalla resistenza elettrica della membrana, quella del citoplasma, e dal diametro dell'assone (analogamente a un fluido o alla corrente elettrica, un diametro più grande del tubo permetterà alle particelle che devono muoversi di farlo incontrando una minore resistenza). A questo punto, è intuitivo pensare che più bassa sarà la costante di tempo e più grande la distanza caratteristica, maggiore sarà la velocità con cui si propaga il segnale elettrico lungo un assone. Per esempio, considerando che la distanza caratteristica è proporzionale alla radice quadrata del diametro dell'assone, ci aspettiamo che anche la velocità di propagazione del segnale sia proporzionale alla radice quadrata del diametro dell'assone. Quindi, maggiore è il diametro dell'assone, maggiore sarà la velocità di propagazione. In questo modo si comprende come le caratteristiche intrinseche delle cellule nervose determinino la velocità di propagazione dei segnali elettrici. Altri aspetti, sempre connessi all'aumento della velocità di propagazione dei segnali, riguardano il fatto che gli assoni sono ricoperti da uno strato chiamato di mielinizzazione che permette di diminuire la capacità elettrica della membrana, facendo diminuire di conseguenza la costante di tempo del condensatore.

2.7.3 La velocità di movimento di una cellula

La capacità di migrare da parte delle cellule è alla base di quasi tutti i processi biologici. Esistono diversi meccanismi biochimici sottesi alla migrazione di una cellula. Per quanto riguarda i batteri o cellule soggette a movimento tramite flagelli o ciglia, il loro movimento quasi natatorio all'interno di una soluzione

 © 978-88-08-92045-4

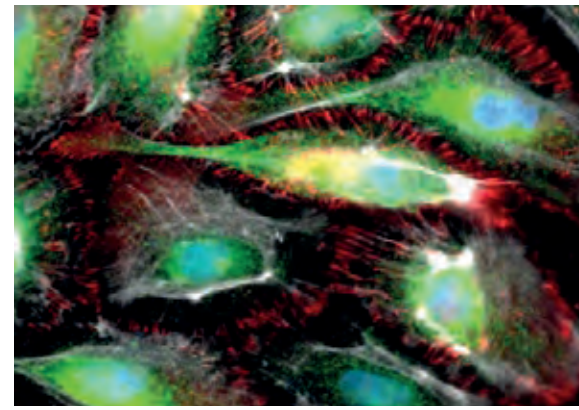


Figura 2.31 • Immagine in immunofluorescenza di cellule in cui sono visibili le protrusioni di actina (marcate in bianco) terminanti con i centri di adesione focale (marcati in rosso).

acquosa ha richiesto l'evoluzione di meccanismi particolari che siano in grado di prevalere sull'elevata viscosità dell'acqua alla scala di interesse dei batteri stessi. Questi aspetti verranno trattati in modo specifico nel contesto dello studio dei fluidi e della loro viscosità (Capitolo 8). Per quanto riguarda cellule eucariote in adesione, esistono principalmente due meccanismi per la migrazione. Il primo è basato sulla formazione di *blebs* ottenuti per effetto di variazioni di pressione idrostatica all'interno della cellula. Queste protrusioni della membrana cellulare non sono caratterizzate dalla presenza di actina corticale nella fase iniziale. L'altro meccanismo è rappresentato dalla formazione di protrusioni sotto la spinta della **polimerizzazione di actina** (**Figura 2.31**). La velocità di polimerizzazione dei filamenti di actina risulta quindi determinante per la velocità di migrazione della cellula. Ovviamente, non solo la spinta in avanti di una parte della cellula è importante, ma anche la capacità di contrarre la parte posteriore della cellula per spostarla nel verso di migrazione. Per quest'ultimo meccanismo è fondamentale la meccanica della cellula e la contrazione del sistema actina-miosina. Nel Capitolo 15, nel contesto del moto Browniano e della diffusione, verrà introdotto un modello matematico che riesce a descrivere la migrazione di cellule estraendone dei parametri quantitativi che permettono un confronto tra diversi tipi cellulari e diverse condizioni ambientali.

Vedi **Capitolo 8**
I fluidi in moto

Vedi **Capitolo 15**
Random walk e diffusione

Le diverse fasi del processo di migrazione cellulare possono essere riassunte come segue:

1. allungamento per polimerizzazione di actina di una protrusione cellulare;
2. formazione di regioni di adesione tra la protrusione e la matrice extracellulare;
3. distaccamento delle zone di adesione con la matrice extracellulare nella regione posteriore della cellula;
4. azione dei motori molecolari, in particolare la miosina, per richiamare verso la parte anteriore la regione posteriore della cellula.

Il processo di migrazione è quindi determinato in larga misura dalla polimerizzazione e depolimerizzazione dei filamenti citoscheletrici. Lo stesso processo di polimerizzazione può essere considerato infatti come una forma di movimento molto semplice, che non richiede elaborati meccanismi basati per esempio su motori molecolari. È quindi plausibile che la velocità di migrazione di una cellula sia collegata alla velocità di polimerizzazione degli elementi del suo citoscheletro. Tutti i processi connessi alla migrazione di una cellula coinvolgono la presenza di forze meccaniche. Nel Capitolo 3, nel contesto di una discussione sulle forze che può generare una cellula, vedremo come attraverso la polimerizzazione sia possibile che i filamenti citoscheletrici esercitino una

Vedi **Capitolo 3**
La forza elastica e l'attrito

CAPITOLO 3

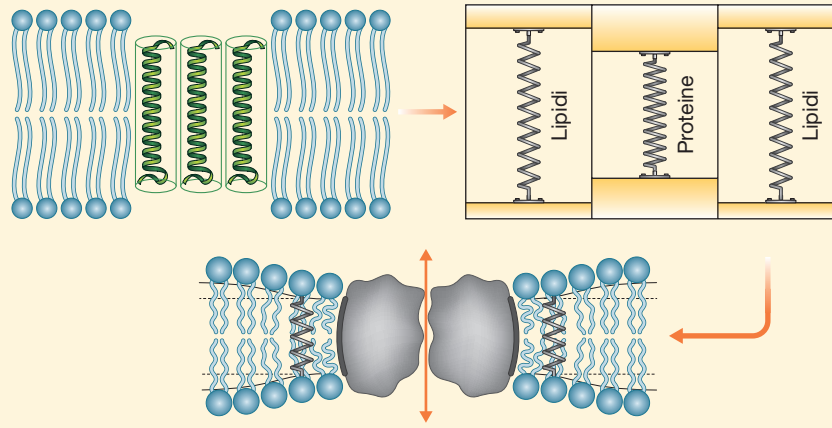
La forza elastica e l'attrito

 © 978-88-08-92045-4

Esercizi svolti
Bibliografia
Sitografia

Il modello della molla nei sistemi biologici

La molla viene utilizzata come modello per la descrizione di molte deformazioni nei sistemi biologici. Il modello stabilisce che alle deformazioni possiamo associare un'energia che è direttamente proporzionale al quadrato della deformazione e a una costante elastica specifica.



Deformazione elastica del doppio strato lipidico al variare della conformazione di proteine di transmembrana

3.1 *Ut tensio sic vis*: la forza elastica

La forza elastica è una forza che può essere utilizzata per descrivere il comportamento di moltissimi sistemi, anche di tipo biologico. Il tratto distintivo di questa forza è che la sua intensità è direttamente proporzionale allo spostamento dalla posizione di equilibrio del sistema interessato, sia esso una molla meccanica o un doppio strato lipidico. La forza è sempre di richiamo, cioè opposta allo spostamento, e tende a riportare il sistema nella sua posizione di equilibrio. La costante di proporzionalità prende il nome di **costante elastica**. La legge che descrive tale comportamento può essere riassunta nell'espressione seguente:

$$F = -kx \qquad [3.1]$$

in cui F è la forza elastica, x è lo spostamento del sistema dal suo stato di equilibrio (cioè la condizione in cui $\mathbf{F} = 0$ N) e k è la costante elastica. Considerando la **Figura 3.1**, ciò vuol dire che la forza necessaria per deformare una molla dalla sua posizione di equilibrio è direttamente proporzionale al modulo di tale deformazione, sia in allungamento sia in accorciamento. L'espressione riportata nell'equazione [3.1] prende il nome di **legge di Hooke**.

L'importantissima figura di Robert Hooke, a cui si deve anche il primo uso della parola **cellula**, viene presentata nella ▶ *Nota storica – L'instancabile Robert Hooke e la nascita della teoria cellulare*, in cui verrà spiegato anche il titolo del presente paragrafo, essendo esso la soluzione di un anagramma in latino con cui Hooke presentò per la prima volta la sua legge sulle molle.

In questo capitolo prenderemo in esame la forza elastica applicata al caso di una molla recante una massa alla sua estremità. Assumeremo che tutta la massa

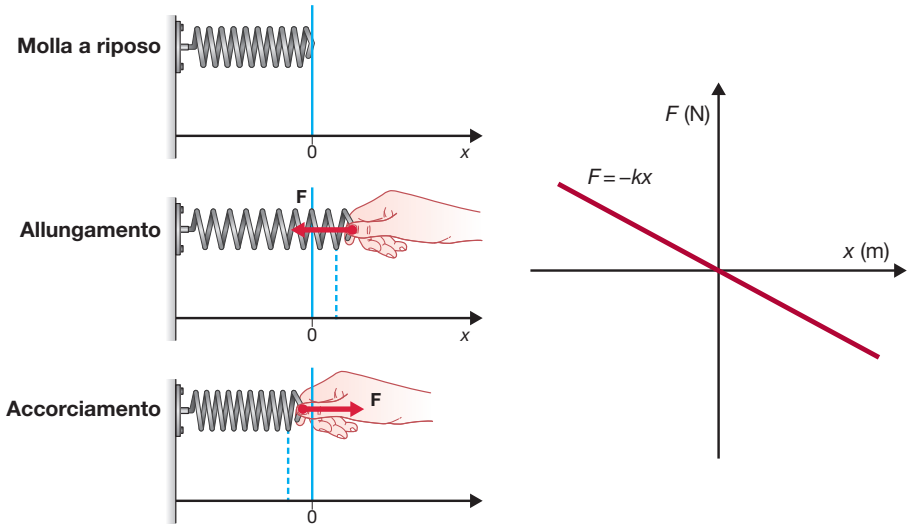


Figura 3.1 • Forza della molla a seguito di una sua deformazione. L'allungamento e l'accorciamento di una molla richiedono una forza opposta a quella della molla direttamente proporzionale allo spostamento dalla posizione di equilibrio.

sia concentrata all'estremità della molla e che la molla stessa sia di massa trascurabile. Nel Capitolo 14 generalizzeremo la legge di Hooke al caso dei corpi estesi e considereremo le loro deformazioni sotto l'effetto di pressioni applicate. Come spesso accade per le leggi fisiche, la legge di Hooke va intesa come una prima approssimazione. Essa, infatti, è da considerarsi valida solo nel caso di piccole deformazioni dalla posizione di equilibrio. Come vedremo sempre nel Capitolo 14, la legge di Hooke è una manifestazione dei legami intermolecolari dei materiali considerati, e per una deformazione eccessiva rispetto alla situazione di equilibrio subentrano fattori superiori al primo ordine nel membro a destra dell'equazione [3.1]. Ciò vuol dire che, in queste situazioni, per la forza di richiamo esiste una dipendenza dal quadrato o dalla terza potenza della deformazione non più trascurabile. Inoltre, il comportamento delle molle, e in generale dei materiali, si definisce elastico nei casi in cui la deformazione è completamente reversibile. Questo implica che, una volta rilasciata la forza che causa la deformazione della molla, essa ritorna nella sua posizione di equilibrio iniziale.

CAPITOLO 14 La meccanica dei corpi estesi deformabili

In generale, per le deformazioni di una molla o di un materiale di altra natura riportate in un grafico che rappresenta la deformazione stessa in funzione della forza esistono diverse regioni, come riportato nella **Figura 3.2**. La prima regione riporta un andamento lineare tra forza e deformazione. Successivamente esiste una regione non più lineare in cui la variazione di forza richiesta per causare

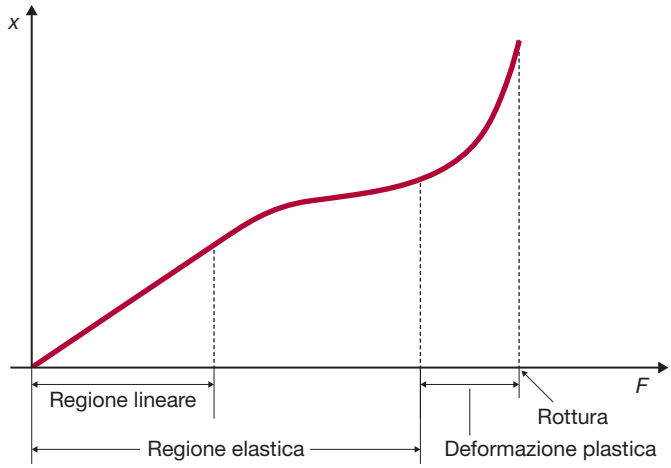


Figura 3.2 • Grafico della deformazione in funzione della forza. Dopo una prima regione lineare, si ha una variazione di pendenza che mostra un aumento della forza necessaria per produrre uguali deformazioni. A questa regione segue poi una regione in cui un piccolo aumento di forza può produrre un'elevata deformazione seguita dalla rottura del sistema. La regione elastica corrisponde a una regione in cui rilasciando la forza si ritorna alla situazione iniziale. Tale regione è seguita dalla regione di deformazione plastica.

 © 978-88-08-92045-4

NOTA STORICA

L'instancabile Robert Hooke e la nascita della teoria cellulare

Robert Hooke nasce nel 1635 in Inghilterra e sin dalla giovane età dimostra un'attitudine notevole all'apprendimento ma anche al lavoro manuale. Costruisce molti strumenti meccanici e, data la sua propensità per i lavori manuali, gli viene suggerito di intraprendere una carriera artistica. Trasferitosi a Oxford, Hooke entra nella cerchia di persone che fonderanno la Royal Society e comincia i suoi studi di matematica, meccanica, astronomia, musica, chimica e anatomia. Intraprende quindi una preparazione globale che farà di lui uno scienziato universale. Hooke, per la sua abilità manuale, l'ottima capacità di disegnare, gli studi universali e la passione per l'ideazione di macchinari e possibili strumenti per il volo, è stato anche descritto come il Leonardo da Vinci d'Inghilterra. L'incontro con Robert Boyle sicuramente segnò la sua attività scientifica e anche la legge fisica che porta il nome di **legge di Boyle** è in qualche modo legata al contributo dato da Hooke alla teoria dei gas. Boyle stesso definisce infatti l'aria come un mezzo elastico e gli esperimenti che lo portarono sulla strada per definire la relazione tra la pressione e il volume di un gas furono realizzati grazie alle pompe da vuoto costruite dallo stesso Hooke. Il motto della Royal Society "*Nullius in verba*" (traducibile con *non bisogna fidarsi delle parole di nessuno* a significare che ogni affermazione deve essere passata al vaglio della sperimentazione) sembrava ideato apposta per rappresentare l'indole di Robert Hooke e, conseguentemente, gli venne subito affidato dalla Società il ruolo di tecnico curatore degli esperimenti, un ruolo che lo impegnò per molti anni a preparare dimostrazioni sperimentali settimanali per conto della Royal Society. Questo ruolo spiega anche perché Hooke su molti aspetti di fisica non poté occuparsi degli approfondimenti necessari che lo avrebbero reso uno scienziato di assoluto livello al suo tempo.

Hooke diede molti contributi importanti alla scienza del suo tempo. La sua opera più importante è sicuramente la *Micrographia*, pubblicata nel 1665, una raccolta di studi e disegni relativi a osservazioni effettuate con un microscopio ottico da lui stesso costruito. Il disegno più famoso è senza dubbio quello della struttura del sughero (**Figura 3.3**). Nel sughero Hooke aveva identificato la presenza di tanti piccoli scompartimenti che egli chiamò *cells* in analogia con le celle dei monaci che venivano dette "cellule". Questa è la prima volta che viene introdotta la parola **cellula** e segna l'inizio della teoria che vede la cellula come unità base degli organismi viventi. Van Leeuwenhoek nel 1674 descrisse poi la prima immagine al microscopio ottico di una cellula viva.

Tra gli altri contributi alla scienza ricordiamo quello che diede anche origine alla diatriba con Newton per il mancato credito da parte di Newton nei confronti di Hooke per la legge della dipendenza dall'inverso del quadrato della distanza per l'attrazione gravitazionale. Hooke aveva infatti comunicato a Newton stesso la sua idea sull'andamento della forza di attrazione gravitazionale prima della pubblicazione dei *Principia*, anche se non è chiaro come fosse arrivato a tale conclusione.

La legge che porta il suo nome fu presentata da Hooke sotto forma di un anagramma latino nell'opera *Helioscopes* del 1676: "ceiiinossttvu". La soluzione dell'anagramma venne fornita due anni dopo dallo stesso Hooke nell'opera *Of springs: "Ut tensio sic vis"* ("Come l'estensione così la forza"). Il significato dell'anagramma è quello della legge che oggi conosciamo con il nome di legge di Hooke e afferma che la forza esercitata dalla molla è proporzionale alla deformazione. A tale legge è attualmente associato il nome dell'instancabile Hooke.

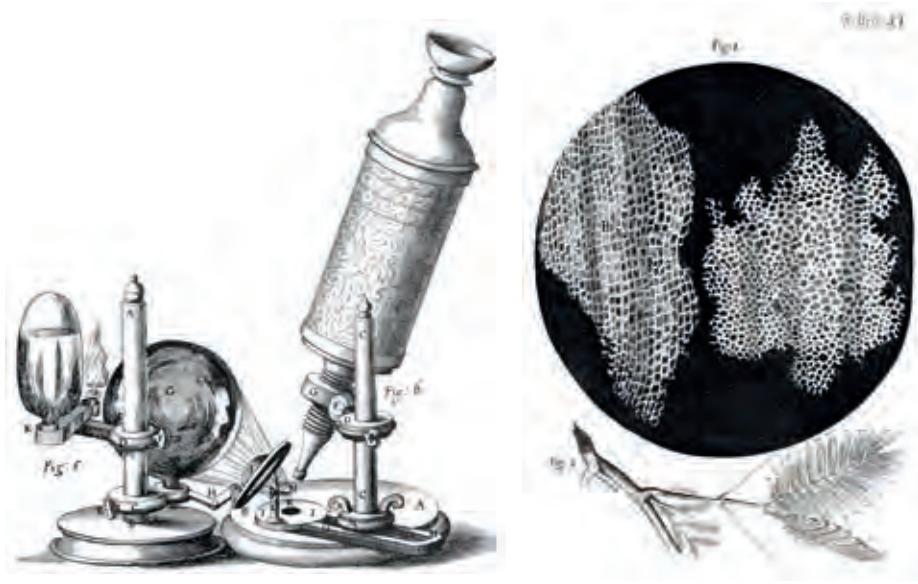


Figura 3.3 • Disegni di Robert Hooke in *Micrographia*.

Nei casi in cui l'oggetto sia di grandi dimensioni oppure si muova con elevata velocità rispetto al mezzo in cui si trova, la forza resistente è tipicamente direttamente proporzionale al quadrato della velocità. Supponiamo che un oggetto si muova attraverso l'aria con velocità v (potrebbe trattarsi di un paracadutista in caduta libera prima di aprire il paracadute). In questo caso la forza resistiva è data da:

$$F_R = \frac{1}{2} DA\rho v^2$$

in cui D è un coefficiente adimensionale che dipende dalla geometria dell'oggetto (per una sfera ha un valore di 0,5 mentre è più elevato per forme più irregolari), A è l'area della sezione misurata in un piano perpendicolare alla direzione della velocità v e ρ è la densità dell'aria. Se tale oggetto è in caduta libera sotto l'effetto di una forza di gravità costante, avremo una situazione analoga al caso trattato in precedenza. In questo caso la velocità limite v_l verrà determinata dall'equazione:

$$0 = mg - \frac{1}{2} DA\rho v_l^2$$

$$v_l = \sqrt{\frac{2mg}{DA\rho}} \qquad [3.22]$$

Il concetto di velocità limite è fondamentale in diverse tecniche biochimiche volte a separare tra loro molecole od oggetti biologici sulla base di specifiche caratteristiche. Queste tecniche comprendono la sedimentazione, la centrifugazione e l'elettroforesi. Nel caso della sedimentazione la forza che muove gli oggetti è la forza peso, nel caso della centrifugazione è un campo gravitazionale efficace prodotto da un sistema rotante e nel caso dell'elettroforesi è la forza elettrica prodotta dalla presenza di un campo elettrico agente sulle cariche elettriche di biomolecole. La trattazione delle tecniche è affrontata nel ▶paragrafo 8.11 per la sedimentazione e la centrifugazione e nel ▶paragrafo 18.16 per l'elettroforesi. La trattazione completa nei primi due casi richiede di tener conto della spinta di Archimede che agisce sui corpi immersi in un liquido, che verrà considerata nel Capitolo 7.

Vedi **Capitolo 8**
I fluidi in moto

Vedi **Capitolo 18**
Il campo elettrico in soluzione e l'elettricità nei sistemi biologici

Vedi **Capitolo 7**
Statica dei fluidi

La velocità limite che abbiamo trovato con le equazioni [3.17] e [3.22] ci permette di riconciliarci con l'evidenza sperimentale che un oggetto dotato di una massa maggiore cade nel campo gravitazionale effettivamente con una velocità maggiore. Se si esclude infatti la prima parte del moto in cui il corpo in caduta libera accelera, per gran parte della caduta la velocità sarà costante e dipendente dalla massa dell'oggetto. Questo comportamento era ciò che aveva considerato Aristotele. Lo stesso Aristotele era inoltre consapevole che per la caduta di un oggetto all'interno di un mezzo la sua velocità di caduta era inversamente proporzionale alla densità del mezzo:

$$v_l \propto \frac{1}{\rho}.$$

Questa relazione aveva portato Aristotele al concetto di *horror vacui*, cioè all'idea che la natura aborre il vuoto, dato che se la densità ρ fosse 0, i corpi cadrebbero con una velocità infinita. Dato che una tale velocità non è possibile, non può esistere neanche il vuoto. Si dovette aspettare Torricelli per dimostrare la possibilità dell'esistenza del vuoto, come vedremo nel ▶paragrafo 7.6.

 © 978-88-08-92045-4

È possibile comprendere sulla base dei principi del moto di Newton come si può ottenere una forza di attrito che dipende dal quadrato della velocità? Intuitivamente si può considerare che un oggetto cadendo deve spostare una certa massa m di fluido con un'accelerazione a, e la forza necessaria $F = ma$ è, per il III principio di Newton, uguale e contraria alla forza che si oppone al moto, cioè la forza di attrito, che in questo caso viene anche denominata **forza di trascinamento**. La massa di aria da spostare dipende quindi dalla velocità dell'oggetto che sta cadendo (se raddoppio la velocità, raddoppio anche la massa di aria da spostare). Ma se si raddoppia la velocità e si considera che la quantità di moto durante l'urto con una molecola d'aria varia da mv a $-mv$, cioè si ha una variazione di $2mv$, ciò equivale a raddoppiare l'accelerazione a impartita alle molecole. L'effetto risultante della variazione di massa d'aria e della variazione di quantità di moto (direttamente proporzionale all'accelerazione) raddoppiando la velocità sarà dato da $\Delta F = 2m \cdot 2a$, cioè la forza che si oppone al moto diventa quattro volte più intensa. Da questo ragionamento si può comprendere il senso di una forza di trascinamento proporzionale al quadrato della velocità. Tuttavia, la situazione è molto più complessa e, a seconda di tanti possibili casi diversi che si possono riscontrare nella realtà, la dipendenza dalla velocità potrebbe essere di semplice proporzionalità diretta o, più in generale, del tipo $F \propto -cv^n$ con n dipendente dalla situazione specifica e non necessariamente un numero intero.

Un'altra importante osservazione riguarda il ruolo della velocità limite nel caso di piccoli animali che cadono in aria. Con l'equazione [3.22] abbiamo visto come la velocità limite dipenda sia dalla massa sia dall'area A della sezione del corpo che cade misurata in un piano perpendicolare alla direzione della velocità. Se consideriamo la geometria di un cubo, ci accorgiamo che per esso vale la **legge** chiamata anche **del quadrato-cubo** che stabilisce che mentre il volume, e quindi la massa, cresce con il cubo del lato dell'oggetto, la sua superficie cresce con il quadrato del lato. Ne consegue che un piccolo animale avrà un rapporto m/A molto più piccolo rispetto a un animale di grandi dimensioni. La velocità limite raggiunta dai piccoli animali sarà quindi decisamente minore ed essi potranno cadere da elevate altezze senza danni per il loro corpo.

3.6 La meccanobiologia e la produzione di forze all'interno della cellula

Vedi **Capitolo 2** La meccanica

Come già ricordato nell'introduzione alla meccanica (Capitolo 2), negli ultimi tempi si è sempre più diffusa l'idea che le forze meccaniche siano un importante stimolo per le cellule e, al tempo stesso, che la cellula possa utilizzare le forze meccaniche che è in grado di produrre per sondare gli aspetti meccanici del suo microambiente e prendere decisioni su possibili percorsi biochimici in base alla risposta ottenuta. Meccanismi per sondare le forze sono associati ai sensi quali il tatto e l'udito, in cui canali ionici nella membrana biologica modificano il loro stato in risposta a uno stimolo meccanico. Comunicare dei segnali con forze applicate è un modo alternativo rispetto a quello tradizionale biochimico basato sulla diffusione di molecole o sulla modifica conformazionale di proteine. Uno stimolo applicato a un estremo di un filamento di actina agganciato alla membrana cellulare può, per esempio, essere molto velocemente trasmesso all'interno del nucleo di una cellula se il filamento è ancorato alla membrana nucleare all'altro estremo. Una volta che lo stimolo arriva al nucleo possono avvenire processi che alterano la configurazione della

cromatina e quindi l'espressione di alcune proteine. La **struttura citoscheletrica** è quindi il sistema attraverso il quale le forze possono essere trasmesse all'interno del citoplasma.

La meccanobiologia è la scienza che si occupa di studiare questi aspetti. Essa può essere divisa in due settori: uno in cui viene studiato come una cellula è in grado di applicare forze sull'ambiente in cui si trova e un altro in cui si studia come una cellula possa reagire a forze applicate su di essa dall'esterno. Nel primo caso è importante analizzare la sequenza degli eventi biochimici che possono scaturire dalla reazione alle forze applicate dalla cellula. Se le forze meccaniche servono per sondare l'ambiente circostante, qualunque evento che ne scaturisce per essere rilevante per la cellula deve essere di natura biochimica. La trasduzione di un segnale meccanico in un evento biochimico è quindi uno degli aspetti principali della meccanobiologia. Il secondo settore può invece essere rilevante per fini diagnostici, infatti molto spesso uno stato patologico per una cellula, o un tessuto, corrisponde a un'alterazione delle loro proprietà meccaniche. Le forze in gioco sono in questi casi molto piccole (dell'ordine dei pN o nN) e per poterle studiare sperimentalmente sono stati sviluppati appositi strumenti e dispositivi. Nel corso di quest'opera analizzeremo un po' più in dettaglio alcune di queste tecniche (microscopia a forza atomica e pinze ottiche), mentre in questo contesto analizzeremo i modi in cui una cellula può generare ed esercitare delle forze, per esempio, per la migrazione o per sondare l'ambiente circostante della matrice extracellulare. Analizzeremo anche una delle principali ipotesi per l'interpretazione della trasduzione di segnali meccanici in segnali biochimici.

Nel ▶paragrafo 2.7.3 abbiamo considerato i diversi eventi collegati alla migrazione cellulare. Il primo evento per una cellula eucariote è quello dell'estensione di filamenti citoscheletrici per produrre un filopodio. L'**accrescimento dei filopodi** è schematizzato nella **Figura 3.37**. Un singolo filamento di actina si trova vicino alla membrana biologica sulla quale sta applicando una forza. A causa di possibili fluttuazioni (moto Browniano, Capitolo 15) sia della posizione della membrana (dovute alla bassa rigidità meccanica della membrana) sia del filamento di actina, è possibile che venga creato abbastanza spazio tra il filamento di actina e la membrana per far sì che un nuovo monomero di actina riesca a inserirsi andando ad accrescere l'estensione del filamento. In questo modo, la nuova posizione di equilibrio della regione più avanzata della cellula si è spostata di una distanza pari alla dimensione di un monomero di actina, cioè circa 2,7 nm.

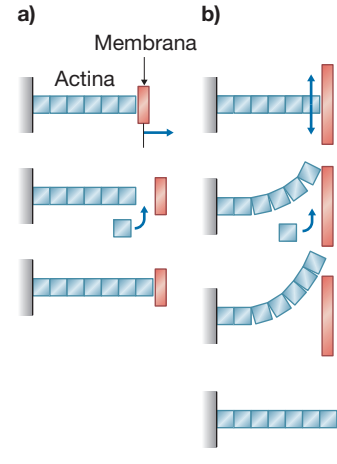


Figura 3.37 • Schema del meccanismo di accrescimento di un filamento di actina in grado di esercitare una forza sulla membrana biologica. Le fluttuazioni sono dovute sia alla **(a)** posizione della membrana con inserimento di un monomero che alle **(b)** deflessioni del filamento di actina.

Vedi **Capitolo 15**
Random walk e diffusione

La forza che un filamento di actina è in grado di applicare in una situazione di questo tipo è quantificabile attraverso la seguente equazione:

$$F_{max} = \frac{k_B T}{\delta} \ln \frac{k_{on}[C]}{k_{off}}$$

in cui δ rappresenta la lunghezza di un monomero di actina (2,7 nm), k_{on} e k_{off} sono le costanti di reazione per l'aggiunta e la rimozione di un monomero al filamento di actina e [C] è la concentrazione di monomeri disponibili. Sostituendo i valori specifici, la forza massima che può essere applicata è di circa 9 pN, equivalente alla forza applicata da parecchie molecole di miosina.

Un altro meccanismo per l'applicazione di forze da parte delle cellule è quello connesso all'utilizzo di motori molecolari attraverso un sistema più evoluto rispetto a quello della polimerizzazione di filamenti citoscheletrici. Uno dei principali sistemi è quello costituito dai filamenti di actina e le proteine della

 © 978-88-08-92045-4

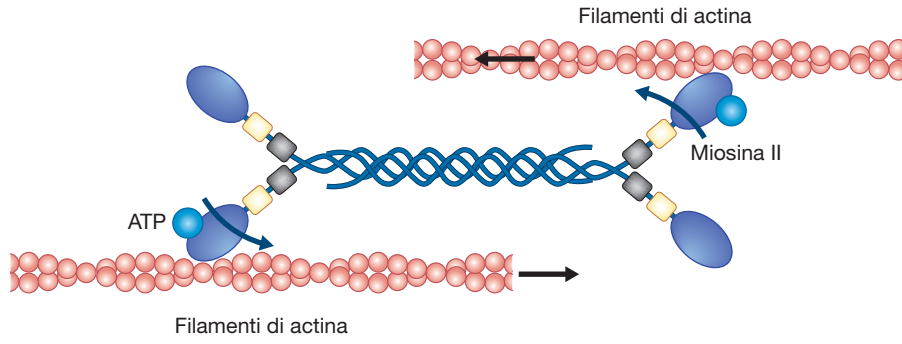


Figura 3.38 • Schema del meccanismo di contrazione che viene realizzato dal complesso actina/miosina II. Le teste delle miosine (in blu) possono ruotare producendo uno spostamento. La rotazione è seguita da uno spostamento in avanti che viene effettuato da altre miosine presenti nel sistema.

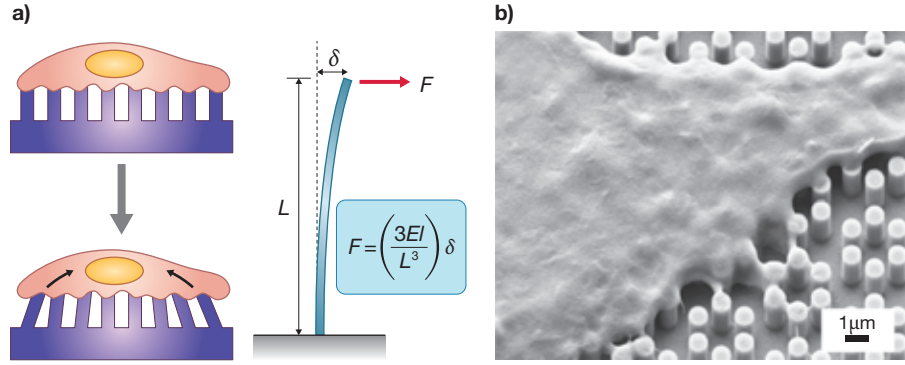


Figura 3.39 • **(a)** Schema di un dispositivo con il quale è possibile misurare le forze di contrazione esercitate da una cellula sul substrato su cui cresce. **(b)** Immagine in microscopia elettronica di una cellula sulle colonne sottostanti.

classe delle miosine (**Figura 3.38**), la coppia di elementi coinvolta anche nel sistema muscolare ma comunque presente in tutte le cellule.

Il **sistema miosina II/actina** è alla base della possibilità da parte delle cellule di applicare forze sulla matrice cellulare che le circonda. Infatti, la miosina II può mettere in contrazione i filamenti di actina e, attraverso i siti di adesione focale, in particolare le integrine, la tensione viene trasmessa alla matrice extracellulare. Le integrine rappresentano infatti le molecole che svolgono il ruolo di collegamento tra le fibre della matrice extracellulare e i filamenti del citoscheletro interni alla cellula. Un'evidenza della contrazione esercitata dai filamenti di actina si può ottenere ponendo le cellule su strutture artificiali costituite da colonne deformabili come quelle mostrate nella **Figura 3.39**. Le colonne appaiono infatti deformate e la forza applicata da una cellula può anche essere quantificata. Infatti, le caratteristiche geometriche e il materiale di cui sono costituite permettono di attribuire un valore di rigidità alle colonne e, dall'entità della deformazione, risalire alla forza necessaria per produrre tale deformazione. La relazione tra la forza e la deformazione è data dalla seguente equazione:

$$F = \frac{3EI}{L^3}\delta$$

in cui E è il modulo di Young del materiale (Capitolo 14), I il momento d'inerzia, L l'altezza della colonna e δ la deformazione. Il termine $(3EI/L^3)$ può quindi essere considerato come una costante elastica del sistema.

CAPITOLO 14 La meccanica dei corpi estesi deformabili

Il sistema miosina II/actina è anche responsabile dell'ultima fase del ciclo di eventi che caratterizzano la migrazione di una cellula, cioè la contrazione per muovere in avanti la parte posteriore della cellula. In questo caso la forza che si sviluppa può essere di qualche nN, dato che le molecole di miosina coinvolte sono migliaia e ciascuna è in grado di applicare circa 1 pN.

CAPITOLO

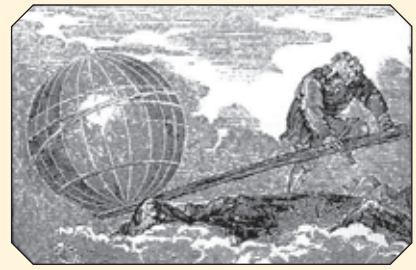
5 La meccanica rotazionale e gli urti

 © 978-88-08-92045-4

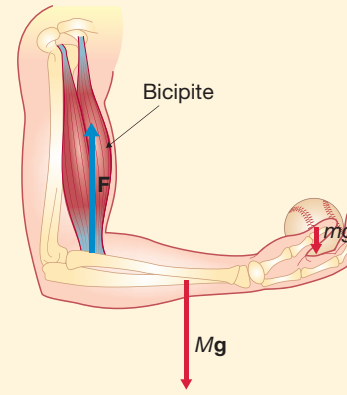
Esercizi svolti
Bibliografia
Sitografia

Un motore rotazionale in biologia e le leve nel corpo umano

La ruota è stata inventata dagli uomini migliaia di anni fa, ma ancora prima la natura stessa aveva realizzato motori basati su moto rotatorio con elevatissima efficienza. E così anche le leve sono state sfruttate nei muscoli da sempre prima che Archimede le studiasse.



Si deve ad Archimede di Siracusa la scoperta del principio della leva. A lui viene attribuita l'esclamazione: «*Da mihi ubi consistam, et terram movebo!*» (Dammi dove appoggiarmi e sposterò la terra!).



Le leve nel corpo umano: il braccio.

5.1 Dal punto materiale ai corpi estesi

In questo capitolo ci occuperemo delle leggi fisiche che descrivono il moto di corpi estesi. Rilasceremo quindi l'approssimazione di punto materiale che abbiamo utilizzato nei primi capitoli del libro, in cui ci siamo occupati della descrizione e della spiegazione del moto. In realtà, avevamo specificato che il corpo considerato durante il moto poteva avere una sua estensione finita, ma avevamo limitato lo studio alla situazione in cui tutti i punti del corpo esteso erano caratterizzati dallo stesso moto, escludendo la possibilità di rotazioni del corpo. In questo capitolo rilasceremo questa condizione. Non tutto ciò che è stato fatto è comunque inutile nel contesto dei corpi estesi. Troveremo infatti che per i corpi estesi, e in generale per un insieme di punti materiali, esiste un punto che si muove di moto traslazionale e per il quale sono valide le leggi che abbiamo trovato nei precedenti capitoli.

Cominceremo il capitolo con una definizione generale del concetto del centro di massa di un sistema di punti materiali per poi riprendere e approfondire gli aspetti di cinematica rotazionale. Avevamo infatti già incontrato alcuni di questi concetti nella descrizione del moto circolare uniforme. Ora introdurremo anche la possibilità di una variazione nel tempo della velocità angolare, cioè la presenza di un'accelerazione angolare. Introdurremo inoltre il concetto di momento di inerzia, il quale rappresenta l'analogo rotazionale della massa inerziale per il moto traslazionale.

Come vedremo, infatti, il momento di inerzia rappresenta la tendenza di un corpo a opporsi a variazioni di moto rotazionale attorno a un asse specificato.

Ciò vuole anche dire che, mentre esiste un'unica massa inerziale per un corpo, esistono infiniti valori del momento di inerzia per un corpo al variare dell'asse di rotazione che si considera.

Introdurremo anche l'analogo del II principio del moto di Newton nel caso rotazionale, considereremo cioè la capacità di una forza di indurre un moto rotazionale attraverso il concetto di momento di una forza. Questa sarà l'occasione per definire in modo più generale le condizioni di equilibrio per un corpo. È opportuno specificare sin dall'inizio che in quest'opera affronteremo in modo semplificato il moto rotazionale. Ci limiteremo infatti a considerare corpi estesi su una superficie planare e le loro rotazioni attorno a un asse fisso nel tempo e perpendicolare al piano della stessa superficie estesa. Questo ci permette di definire la rotazione del corpo utilizzando un unico angolo e di semplificare enormemente la trattazione conseguente.

Presenteremo alcuni esempi in cui il moto rotatorio è sfruttato da elementi biologici per produrre energia e spostare microrganismi, quali i batteri, in un mezzo viscoso, quale una soluzione acquosa.

Introdurremo inoltre il concetto della leva, studiato in modo molto illuminato nell'antichità da Archimede. La leva offre la possibilità di qualche considerazione relativamente alla struttura del nostro corpo e alle leve in esso presenti che ci permettono di svolgere molte funzioni.

Proseguiremo poi con un'analisi del moto giroscopico. Anche in questo caso la trattazione sarà semplificata, ma la riteniamo comunque utile per comprendere il moto di precessione che verrà poi ritrovato nell'analisi della risonanza magnetica nucleare.

Termineremo il capitolo con un'analisi dei possibili urti tra corpi, utile in vista di una descrizione microscopica per esempio della termodinamica, in cui i parametri macroscopici possono essere interpretati ricorrendo alla teoria cinetica dei gas in cui le particelle subiscono continui urti con le pareti del contenitore. Tale argomento viene affrontato in questo capitolo perché un possibile metodo di analisi degli urti è quello di utilizzare il sistema di riferimento associato con il centro di massa del sistema costituito dagli oggetti coinvolti nell'urto. Tale trattazione, anche se apparentemente più complicata da intuire, offre soluzioni matematicamente più immediate.

5.2 Il centro di massa

Supponiamo di considerare un vassoio che ha sulla sua superficie due oggetti di massa diversa posizionati in due parti diametralmente opposte, come mostrato nella **Figura 5.1**. Un cameriere che dovesse sollevare tale vassoio utilizzando una sola mano sa che dovrebbe posizionarla in un punto che sia più vicino al corpo di massa maggiore rispetto a quello di massa minore. Se solleva con questo accorgimento il vassoio, riuscirà a spostarlo facendogli compiere esclusivamente un moto traslazionale. Se dovesse invece sollevare il vassoio posizionando la mano in altri punti, il vassoio si troverebbe a ruotare, oltre ad avere un moto di traslazione.

Capiamo quindi che, se abbiamo una distribuzione di corpi materiali dotati di massa, esiste un punto specifico tale per cui, applicandovi una forza, il sistema si comporterà come se tutta la massa fosse concentrata in quel punto. In questo modo è come se ritornassimo al concetto di punto materiale privo di dimensione e il cui moto è unicamente traslazionale. Tale punto prende il nome di **centro di massa**.

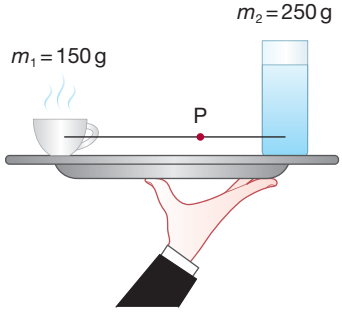


Figura 5.1 • Sorreggendo in un punto specifico P un vassoio con una sola mano è possibile mantenerlo in equilibrio. Il punto P sarà più vicino all'oggetto di massa maggiore.

 © 978-88-08-92045-4

Anche in questo caso possiamo poi definire un'accelerazione istantanea con un passaggio al limite:

$$\alpha_i = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\vartheta}{dt^2}.$$

Dato che la velocità angolare è un vettore, anche l'accelerazione angolare sarà un vettore, la cui direzione è la stessa della velocità angolare ma il cui verso dipende dal segno della derivata della velocità angolare rispetto al tempo. In particolare:

- se $\frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} > 0$ $\boldsymbol{\alpha}$ ha lo stesso verso di $\boldsymbol{\omega}$;
- se $\frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} < 0$ $\boldsymbol{\alpha}$ ha il verso opposto di $\boldsymbol{\omega}$.

Se consideriamo l'espressione che stabilisce la relazione tra la velocità lineare e quella rotazionale, possiamo facilmente trovare la relazione tra le due accelerazioni, quella lineare e quella rotazionale. Infatti:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d(r\omega)}{dt} = r\frac{d\omega}{dt} = r\alpha. \qquad [5.10]$$

Il passo successivo è quello di considerare un moto che avviene con accelerazione angolare costante. In questo caso possiamo considerare i seguenti passaggi:

$$\frac{d\omega}{dt} = \alpha$$

$$d\omega = \alpha dt$$

$$\int_{\omega_0}^{\omega} d\omega = \alpha \int_0^t dt$$

$$\omega = \omega_0 + \alpha t$$

in cui ω_0 rappresenta la velocità angolare al tempo $t = 0$. Abbiamo così ottenuto l'espressione per l'andamento della velocità angolare nel tempo. Da questa è possibile poi ottenere la legge oraria che ci fornisce il valore dell'angolo nel tempo per un moto con accelerazione angolare costante. Essa si ottiene con i seguenti passaggi:

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \omega_0 + \alpha t$$

$$d\vartheta = \omega_0 dt + \alpha t dt$$

$$\int_{\vartheta_0}^{\vartheta} d\vartheta = \omega_0 \int_0^t dt + \alpha \int_0^t t dt$$

$$\vartheta - \vartheta_0 = \omega_0 t + \frac{1}{2}\alpha t^2$$

in cui ϑ_0 rappresenta il valore dell'angolo al tempo $t = 0$. Abbiamo così ottenuto la legge oraria per un moto con accelerazione angolare costante. Come si può vedere, le espressioni per il moto rotazionale sono simili a quelle del moto

Tabella 5.1 • Confronto delle relazioni cinematiche tra moto traslazionale e moto rotazionale nel caso di un moto con accelerazione costante.

Moto traslazionale con accelerazione costante	Moto rotazionale con accelerazione costante
$a = \text{cost}$	$\alpha = \text{cost}$
$v = v + at$	$\omega = \omega_0 + \alpha t$
$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2}at^2$	$\vartheta = \vartheta_0 + \omega_0 t + \frac{1}{2}\alpha t^2$
$v^2 = v_0^2 + 2a(x - x_0)$	$\omega^2 = \omega_0^2 + 2\alpha(\vartheta - \vartheta_0)$

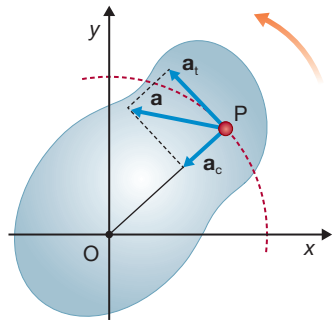


Figura 5.14 • Accelerazione tangenziale $\mathbf{a}_t$ e centripeta $\mathbf{a}_c$ per un punto P di un corpo esteso in moto rotazionale. L'accelerazione complessiva $\mathbf{a}$ è la somma vettoriale delle due.

traslazionale con una sostituzione dei parametri s, v e a con i rispettivi parametri ϑ, ω e α. Nella **Tabella 5.1** vengono messe a confronto le espressioni della cinematica traslazionale e quelle della cinematica rotazionale.

L'accelerazione angolare che abbiamo appena considerato è direttamente responsabile di quella che, nella **Figura 5.14**, viene chiamata **accelerazione lineare tangenziale** $\mathbf{a}_t$, cioè l'accelerazione lungo la tangente alla circonferenza descritta dal punto materiale durante il suo moto. Ovviamente, sappiamo dal Capitolo 2 che per la dinamica del moto circolare, affinché un punto materiale si muova su una circonferenza, è necessaria la presenza di una forza centripeta diretta verso il centro della circonferenza, la quale determinerà la presenza anche di un'accelerazione centripeta $\mathbf{a}_c$. Le due accelerazioni sono quindi perpendicolari l'una all'altra. Di conseguenza, il punto materiale P che stiamo considerando avrà un'accelerazione vettoriale complessiva data da:

Vedi **Capitolo 2** La meccanica

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}_t + \mathbf{a}_c.$$

Considerando che il modulo dell'accelerazione centripeta è dato dalla relazione $a_c = v^2/r = r\omega^2$, il modulo dell'accelerazione complessiva sarà dato da:

$$a = \sqrt{r^2\alpha^2 + r^2\omega^4} = r\sqrt{\alpha^2 + \omega^4}.$$

Per concludere la sezione dedicata alla cinematica rotazionale, vale la pena ricordare che, per un corpo rigido in rotazione interno a un asse fisso, tutti i punti del corpo hanno la stessa velocità angolare e la stessa accelerazione angolare, mentre le corrispondenti quantità traslazionali dipendono dalla distanza di ciascun punto dall'asse di rotazione considerato secondo le espressioni [5.9] e [5.10].

Esempio 5.3

Il moto rotazionale di una centrifuga

Una centrifuga sta ruotando a una velocità angolare pari a 1000 giri/min. A un certo istante $t = 0$ viene frenata e impiega 100 s per fermarsi completamente. Assumendo che la decelerazione sia costante, determiniamo il suo valore, quanti giri compie prima di fermarsi e, considerando una provetta che si trova a una distanza di 15 cm dal centro di rotazione, calcoliamo il valore dell'accelerazione in quel punto quando la centrifuga comincia a fermarsi.

Come primo passo è necessario trasformare la velocità angolare iniziale da giri/min a rad/s. Per fare ciò eseguiamo il seguente calcolo:

$$\omega_0 = 1000 \times \frac{2\pi\,\text{rad}}{60\,\text{s}} = 104{,}7\,\frac{\text{rad}}{\text{s}}.$$

 © 978-88-08-92045-4

Dato che il moto dal momento in cui la centrifuga comincia a frenare è uniformemente accelerato, abbiamo:

$$\omega = \omega_0 + \alpha t$$

$$0 = 104{,}7\,\frac{\text{rad}}{\text{s}} + \alpha \times 100\,\text{s}$$

$$\alpha = -1{,}05\,\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}.$$

L'angolo descritto prima di fermarsi può essere ottenuto utilizzando la legge oraria per il moto uniformemente accelerato:

$$\Delta\vartheta = \vartheta - \vartheta_0 = \omega_0 t + \frac{1}{2}\alpha t^2$$

$$\Delta\vartheta = 104{,}7\,\frac{\text{rad}}{\text{s}} \times 100\ \text{s} + \frac{1}{2}\left(-1{,}05\,\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}\right) \times (100\ \text{s})^2 = 5220\,\text{rad}.$$

Dato che un intero giro corrisponde a 2π radianti, il numero di giri n prima di fermarsi sarà:

$$n = \frac{5220}{2\pi} = 830{,}8\,\text{giri}.$$

Se consideriamo un punto a una distanza di 15 cm = 0,15 m dal centro di rotazione, l'accelerazione tangenziale sarà data da:

$$a_t = r\alpha = 0{,}15\,\text{m} \times 1{,}05\,\frac{\text{rad}}{\text{s}^2} = 0{,}16\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}.$$

mentre l'accelerazione centripeta è data da:

$$a_c = r\omega_0^2 = 0{,}15\,\text{m} \times \left(104{,}6\,\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right)^2 = 1641\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}.$$

L'accelerazione complessiva a è data da:

$$a = \sqrt{a_t^2 + a_c^2} \approx a_c = 1641\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

in cui abbiamo considerato che l'accelerazione centripeta è molto maggiore rispetto all'accelerazione tangenziale.

Esempio 5.4

Il moto rotatorio in biologia

I moti rotatori non sono dominio esclusivo delle macchine inventate dall'uomo. In biologia esistono diversi esempi di sistemi che eseguono moti rotatori e questi sono anche di fondamentale importanza per i processi vitali. Considereremo brevemente due esempi: l'enzima F_1 ATP sintasi e il sistema che permette la rotazione del flagello di *Escherichia coli*.

La prima molecola che consideriamo, l'**ATP sintasi**, è un enzima che permette un'efficientissima produzione di ATP, la moneta universale nel mondo biologico. Tale complesso si trova sia nei batteri sia nelle cellule di mammifero con una struttura simile. Come mostrato nella **Figura 5.15**, vi è un'unità centrale

CAPITOLO

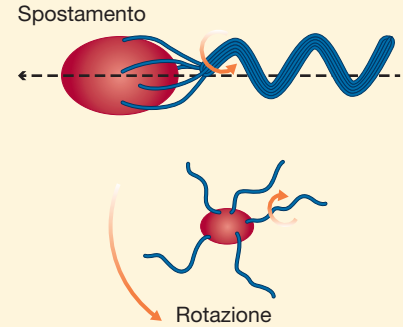
8 I fluidi in moto

 © 978-88-08-92045-4

Esercizi svolti
Bibliografia
Sitografia

Il moto dei batteri in acqua

I batteri, per muoversi all'interno di un mezzo acquoso, hanno dovuto evolvere strutture e meccanismi che permettessero loro di superare i problemi legati al mezzo estremamente viscoso per le loro dimensioni e forze.



I batteri si muovono in acqua facendo ruotare i loro flagelli a forma elicoidale. La rotazione in verso antiorario produce uno spostamento, mentre la rotazione in verso orario produce una riorientazione del batterio.

8.1 Muoversi in un fluido

Nel capitolo precedente abbiamo considerato la statica dei fluidi, cioè la descrizione dei fluidi in equilibrio. Tale parte della scienza dei fluidi era stata ampiamente sviluppata già da Archimede e poi perfezionata da Stevino, Pascal e Newton. Ora cominciamo a occuparci dei fluidi in movimento. Continueremo a non considerare il comportamento dei fluidi a livello delle singole molecole che li compongono ma utilizzeremo di nuovo l'approssimazione del continuo. Considereremo cioè il moto di piccoli elementi di fluido caratterizzati dalla loro densità. Questa approssimazione ci permette di evitare la complessità del comportamento a livello microscopico, in cui le molecole si muovono in ogni direzione sotto l'effetto dell'agitazione termica. L'idea per la meccanica del continuo è quella di determinare il moto degli elementi del fluido considerando le forze che agiscono su di essi. La traiettoria seguita da ciascuno di questi elementi di fluido si definisce **linea di flusso**. Il concetto di continuità implica che, considerando elementi di fluido sempre più piccoli, questi non smettono di comportarsi come dei fluidi. Questo comportamento è anche implicito nella trattazione fisico-matematica basata su equazioni differenziali che, come avremo modo di intravedere, è alla base dell'analisi fisica del moto dei fluidi. In questo capitolo verrà utilizzato in concetto di flusso e ritroveremo una situazione analoga nel caso dello studio dei campi elettrici e magnetici. Il formalismo matematico che utilizzeremo sarà molto simile nei diversi contesti fisici. Ciò che accomuna questi aspetti diversi della fisica è l'idea della presenza di un campo vettoriale. Nel caso dei fluidi, il campo vettoriale utilizzato per la loro descrizione è quello delle velocità di ciascun elemento di fluido, mentre negli altri casi il campo sarà definito dai vettori campo elettrico e campo magnetico.

CAPITOLO

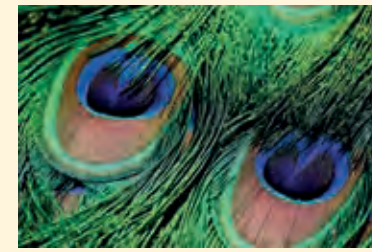
23 Ottica ondulatoria

 © 978-88-08-92045-4

Esercizi svolti
Bibliografia
Sitografia

I colori e la natura

Insieme alla colorazione dovuta ai pigmenti, i fenomeni di interferenza costruttiva e distruttiva sono alla base della colorazione di molti animali. Il fenomeno di interferenza è una diretta conseguenza della natura ondulatoria della luce. Anche la diffrazione è legata alla natura ondulatoria della luce e può essere sfruttata a fini di indagine strutturale.



Fenomeni di colorazione strutturata e da pigmenti nelle piume del pavone.

23.1 La natura ondulatoria della luce

Se la luce si trova a interagire con oggetti di dimensioni molto elevate rispetto alla lunghezza d'onda delle radiazioni che la compongono, ciò che si ottiene quando essa passa dietro a tali oggetti può con buonissima approssimazione essere spiegato con le leggi dell'ottica geometrica. Quando invece la luce interagisce con oggetti di dimensioni confrontabili con la sua lunghezza d'onda, cioè oggetti dalle dimensioni, per esempio, di qualche decina di micrometri, ciò che la luce produce dopo aver interagito con loro non può essere spiegato semplicemente con le leggi dell'ottica geometrica. In questo caso è infatti necessario considerare quella che viene definita **ottica fisica**, in cui viene presa in considerazione la natura ondulatoria della luce.

Vedi Capitolo 22
Ottica geometrica

Nel Capitolo 22 abbiamo considerato la costruzione delle immagini da parte di specchi e lenti utilizzando i metodi dell'ottica geometrica. Questi metodi consentono di tracciare i raggi dagli oggetti alle immagini corrispondenti. In principio, conoscendo le regole per la tracciatura dei raggi nell'ottica geometrica è possibile ricostruire le immagini formate dagli strumenti ottici. In questo modo non è però possibile rendersi conto dei limiti intrinseci di tali dispositivi ottici, per esempio il fatto che un punto oggetto viene sempre trasformato in un'immagine che non è più un punto ma ha una sua struttura interna. In questo capitolo analizzeremo gli aspetti del comportamento della luce strettamente legati alla sua natura ondulatoria, cioè i fenomeni di interferenza, diffrazione e polarizzazione.

Considerando questi aspetti è possibile rendersi conto dei limiti nella formazione delle immagini da parte degli strumenti ottici. In particolare, vedremo che il fenomeno di diffrazione è ciò che limita la risoluzione in un microscopio ottico. I fenomeni di interferenza e diffrazione richiameranno molti dei concetti che abbiamo visto nel contesto delle onde meccaniche. È infatti importante ricordarsi che le onde elettromagnetiche soddisfano l'equazione d'onda lineare e quindi anche per loro vale il principio di sovrapposizione. Vedremo inoltre che è possibile utilizzare film sottili (di solito si indicano in questo modo, anche se può apparire una ripetizione dato che con film si intende già uno spessore

CAPITOLO

24 Gli strumenti ottici

 © 978-88-08-92045-4

Esercizi svolti
Bibliografia
Sitografia

Il microscopio ottico

Pochi strumenti sono stati determinanti per la nascita e lo sviluppo della biologia moderna alla pari del microscopio ottico. Gli sviluppi tecnologici e lo sviluppo delle teorie fisiche necessarie per comprendere il funzionamento di tale tecnica hanno contribuito a migliorarne le capacità di contrasto e di risoluzione e oggi, con l'introduzione delle tecniche di super-risoluzione, si è in grado di studiare il comportamento delle singole molecole coinvolte nei processi biologici.

Il microscopio ottico rovesciato è uno degli strumenti più utilizzati nelle indagini biologiche.

24.1 Gli strumenti ottici e la biologia

Nelle scienze della vita il microscopio ottico rappresenta uno strumento fondamentale. Nel progresso della conoscenza scientifica hanno un ruolo importante sia l'introduzione di nuove idee sia lo sviluppo di nuovi strumenti. Dal punto di vista storico, il microscopio ottico, introdotto tra la fine del XVI secolo e l'inizio del XVII secolo diede un contributo essenziale al progresso delle conoscenze in campo biologico e medico. Abbiamo già accennato al ruolo avuto da Robert Hooke per la nascita della teoria cellulare in biologia, ma uno scienziato che determinò una sorta di rivoluzione scientifica nel XVII secolo fu sicuramente Marcello Malpighi, nato vicino a Bologna nel 1628 e morto a Roma nel 1694. Attraverso l'uso del microscopio, Malpighi fondò l'anatomia microscopica, studiò la struttura microscopica dei tessuti e sviluppò numerose tecniche di colorazione dei campioni biologici che poi furono ulteriormente perfezionate portando progressi fondamentali nella conoscenza anatomica nell'Ottocento. Alcune fonti collegano la nascita del microscopio alla bottega dei lavoratori del vetro in Olanda e Danimarca che avevano già contribuito all'introduzione dei telescopi, ma vi sono alcuni dubbi relativamente a tale attribuzione. Cominceremo comunque il capitolo con una breve storia dello sviluppo e utilizzo del microscopio ottico in biologia e in medicina. Studieremo poi i principi fisici alla base del funzionamento del microscopio ottico e vedremo che attualmente esso si basa sull'uso almeno di due lenti, oltre al nostro occhio che rappresenta comunque un ulteriore dispositivo ottico. Nonostante i primi microscopi ottici adottassero il sistema basato su più lenti (microscopio composto), i migliori

CAPITOLO

25 Introduzione alla meccanica quantistica

 © 978-88-08-92045-4

Il **CAPITOLO 25**
Introduzione alla meccanica quantistica è interamente disponibile online

25.1 La meccanica quantistica e la biologia

25.2 La radiazione di corpo nero

25.3 L'effetto fotoelettrico e l'effetto Compton

Esempio 25.1 L'effetto fotoelettrico da una superficie di argento

Esempio 25.2 La corrente di fotoelettroni

Esempio 25.3 L'urto tra un fotone e un elettrone

25.4 L'ipotesi di de Broglie: la simmetria tra fotoni e particelle

Esempio 25.4 La lunghezza d'onda associata a un elettrone in moto

Esempio 25.5 La lunghezza d'onda di un elettrone e di un protone

25.5 L'ipotesi di de Broglie e l'atomo di Bohr

25.6 Il dualismo onda corpuscolo per gli elettroni: l'esperimento più bello della fisica

Esempio 25.6 L'esperimento della doppia fenditura in numeri

25.7 Il formalismo delle onde per le particelle e il principio di indeterminazione di Heisenberg

25.8 L'equazione di Schrödinger

25.9 L'atomo di idrogeno e i numeri quantici

25.10 La meccanica quantistica per la fotosintesi

25.11 La fisica del nucleo

Esercizi svolti
Bibliografia
Sitografia

Fisica
per le scienze della vita

Risorse online
A questo indirizzo si può accedere al sito di complemento al libro
online.universita.zanichelli.it/alessandrini

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

Guarda!
Le risorse digitali direttamente sullo smartphone.

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

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

Fisica per le scienze della vita propone una lettura specifica, vasta e approfondita dei fenomeni biologici – dalla cellula al moto dei microrganismi alle forze che agiscono nel sistema vascolare, fino alle popolazioni e alle loro relazioni con l'ambiente – attraverso le leggi della fisica, per giungere a comprenderli in termini quantitativi.
L'autore non tralascia alcuno degli argomenti di un classico corso di fisica, ma si concentra sugli strumenti più utili per risolvere problemi che coinvolgono eventi biologici: concetti teorici, all'interno dei quali inquadrarli, e metodi applicativi, per comprendere le tecniche sperimentali più diffuse in questo ambito. Molte tecniche di analisi biochimica, di microscopia e spettroscopia si basano infatti su leggi della fisica: è il caso delle tecniche biochimiche di separazione, sedimentazione, centrifugazione ed elettroforesi, che coinvolgono aspetti della dinamica, o delle tecniche elettrofisiologiche, per citarne alcune.
Viene data molta rilevanza all'intuizione per spiegare un certo fenomeno; si parte da un esempio concreto e solo successivamente si introducono le basi della fisica che possono aiutare a descriverlo, quantificarlo e prevederne l'evoluzione.
La padronanza di concetti matematici, quali derivate e integrali, è necessaria in ogni capitolo; per questa ragione nella prima parte, dedicata agli strumenti di lavoro, sono esposti i metodi matematici più utili.
L'approccio alle principali teorie scientifiche è accompagnato da un inquadramento storico, che permette di capire come procede lo sviluppo scientifico, imparando a distinguere ciò che è solo frutto di una convenzione da ciò che emerge dallo studio della natura.

La comprensione dei concetti è facilitata dai moltissimi *esempi* (numerici e non solo) disseminati nel testo o consultabili online sul sito del libro, dove sono disponibili altre importanti risorse digitali: due *capitoli*, numerosi *approfondimenti*, oltre 300 *esercizi con soluzione*, la *bibliografia* e una ricca *sitografia*, raggiungibile anche con la realtà aumentata (mediante l'app **Guarda!**).

L'autore
Andrea Alessandrini è professore di Fisica applicata presso l'Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia e ha una consolidata esperienza di insegnamento nei corsi di laurea per le Scienze della vita. Il suo ambito di ricerca è la Biofisica, in particolare gli aspetti termodinamici e meccanici dei sistemi biologici.

ALESSANDRINI*FISICA SCI VITA(CEALUM Q
ISBN 978-88-08-92045-4
9 788808 920454
4 5 6 7 8 9 0 1 2 (64D)