

Comprende



versione Ebook
e Software
di simulazione

D. Scannicchio

Fisica Biomedica

IV edizione

Accedi all'ebook e ai contenuti digitali

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



Utilizza il codice personale contenuto nel riquadro per registrarti al sito **edisesuniversita.it** e attivare la tua **area riservata**. Potrai accedere alla **versione digitale** del testo e a ulteriore **materiale didattico**

Scopri il tuo **codice personale** grattando delicatamente la superficie

Il volume NON può essere venduto, né restituito, se il codice personale risulta visibile.
L'accesso ai contenuti digitali sarà consentito **per 18 mesi**.

Per attivare i **servizi riservati**, collegati al sito **edisesuniversita.it** e segui queste semplici istruzioni

Se sei registrato al sito

- clicca su *Accedi al materiale didattico*
- inserisci email e password
- inserisci le ultime 4 cifre del codice ISBN, riportato in basso a destra sul retro di copertina
- inserisci il tuo **codice personale** per essere reindirizzato automaticamente all'area riservata

Se non sei già registrato al sito

- clicca su *Accedi al materiale didattico*
- registrati al sito o autenticati tramite facebook
- attendi l'email di conferma per perfezionare la registrazione
- torna sul sito **edisesuniversita.it** e segui la procedura già descritta per *utenti registrati*



Ulteriori materiali e strumenti didattici sono accessibili dalla propria **area riservata** secondo la procedura indicata nel frontespizio.

Dalla sezione **materiali e servizi** della tua area riservata potrai accedere a:

- **Ebook:** versione digitale del testo in formato epub, standard dinamico che organizza il flusso di testo in base al dispositivo sul quale viene visualizzato. Fruibile mediante l'applicazione gratuita BookShelf, consente una visualizzazione ottimale su lettori e-reader, tablet, smartphone, iphone, desktop, Android, Apple e Kindle Fire.
- **Software di simulazione:** un vastissimo database di quesiti a risposta multipla per effettuare esercitazioni sull'intero programma o su argomenti specifici.

L'accesso ai contenuti digitali sarà consentito per **18 mesi**.

FISICA BIOMEDICA

IV edizione

Domenico Scannicchio

*Dipartimento di Fisica
Università degli Studi di Pavia*

Domenico Scannicchio

FISICA BIOMEDICA - IV edizione

Copyright © 2020, EdiSES Università S.r.l. – Napoli

9 8 7 6 5 4 3 2 1 0
2024 2023 2022 2021 2020

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

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

L'Editore

*L'Editore ha effettuato quanto in suo potere per richiedere
il permesso di riproduzione del materiale di cui non è titolare
del copyright e resta comunque a disposizione di tutti
gli eventuali aventi diritto*

Fotocomposizione: V colore di Francesco Omaggio

Stampato presso:

Tipografia Sograte S.r.l.

Zona Ind. Regnano – Città di Castello (PG)

Per conto della

EdiSES Università S.r.l. – Piazza Dante, 89 – Napoli

www.edisesuniversita.it

ISBN 978 88 3623 019 8

I curatori, l'editore e tutti coloro in qualche modo coinvolti nella preparazione o pubblicazione di quest'opera hanno posto il massimo impegno per garantire che le informazioni ivi contenute siano corrette, compatibilmente con le conoscenze disponibili al momento della stampa; essi, tuttavia, non possono essere ritenuti responsabili dei risultati dell'utilizzo di tali informazioni e restano a disposizione per integrare la citazione delle fonti, qualora incompleta o imprecisa.

Realizzare un libro è un'operazione complessa e, nonostante la cura e l'attenzione poste dagli autori e da tutti gli addetti coinvolti nella lavorazione dei testi, l'esperienza ci insegna che è praticamente impossibile pubblicare un volume privo di imprecisioni. Saremo grati ai lettori che vorranno inviarci le loro segnalazioni e/o suggerimenti migliorativi su assistenza.edises.it

Prefazione alla I edizione

Questo volume è il risultato di una esperienza di vari decenni nell'insegnamento della Fisica in Corsi di indirizzo biosanitario. Il volume è stato concepito attraverso continui aggiornamenti e modifiche e in esso si è cercato di soddisfare le seguenti esigenze ritenute fondamentali e prioritarie:

- la funzione della Fisica negli studi biomedici deve essere principalmente di carattere formativo e metodologico, pur non ignorando l'aspetto informativo;
- svolgere una certa integrazione e armonizzazione della Fisica con altri argomenti facenti parte più specificatamente dei curricula degli studi biomedici o sanitari;
- mettere in risalto l'aspetto strumentale che deriva dall'impiego di molteplici fenomeni fisici, in particolare con scopi diagnostici e terapeutici;
- un testo di Fisica sufficientemente rigoroso e completo diventa un utile riferimento di base nello studio di altri corsi di insegnamento medico-biologici, nel proseguimento degli studi nelle Scuole di Specializzazione di Medicina e nell'attività futura del medico o del biologo.

L'impostazione di questo volume è stata determinata anche dalle successive riforme degli studi nel settore biosanitario, riforme tuttora in corso, in cui il ruolo della Fisica e delle sue applicazioni assume un particolare rilievo non solo per le nozioni concettuali di base, ma anche per i metodi di applicazione di tali nozioni sul piano pratico. Il ruolo della Fisica, infatti, non resta limitato ai soli corsi propedeutici di Fisica e di Fisica Medica, ma con i nuovi ordinamenti si estende a corsi quali Biofisica, Radiobiologia (Scienze biologiche), Strumentazione medica, Fisica sanitaria, Radioterapia e nell'ambito di Corsi di Laurea in Biotecnologie e in Scienze motorie.

Per conciliare l'esigenza di un corso metodologico e formativo con l'integrazione della Fisica nel curriculum di studi biosanitari, si è scelto di alternare capitoli che riportano i concetti fondamentali della Fisica (con qualche sporadica applicazione medico-biologica) a capitoli dedicati interamente alle applicazioni di tali concetti in campo biomedico. Queste applicazioni non sono svolte con la pretesa di essere complete ed esaurienti, ma piuttosto con l'intento di fornire esempi di una trattazione scientificamente rigorosa, anche se necessariamente ridotta a una forma schematica ed essenziale, di alcuni complessi problemi medici e biologici. Nell'operare in questo modo si sono utilizzate il più possibile figure e illustrazioni commentate nel testo o nelle loro didascalie e si sono chiaramente distinte le applicazioni di tipo medico da quelle che si incontrano in Biologia. A questo proposito, nel caso degli studi medico-sanitari, la presenza di applicazioni e di esempi relativi al mondo animale chiarisce il contesto umano e amplia la comprensione dei concetti e delle nozioni svolte. Nel testo inoltre, spesso alla fine dei paragrafi, sono riportati vari esempi e calcoli numerici che forniscono un'utile indicazione degli ordini di grandezza delle quantità fisiche che si incontrano in problematiche biomedicali.

Per mantenere il necessario rigore nella trattazione si è fatto uso di alcune nozioni di Analisi matematica riguardanti lo studio di qualche funzione e le operazioni di derivazione e integrazione in termini semplificati, nozioni che dovrebbero essere impartite nella Scuola secondaria. Comunque la lettura e comprensione del testo non risente, salvo in alcuni punti specifici, del fatto che derivate e integrali siano eventualmente trattati in termini finiti.

Al fine di proporre un testo completo, che possa essere anche utile quale manuale di riferimento nel prosieguo degli studi e nell'attività successiva, sono stati svolti tutti gli argomenti della Fisica classica, con cenni di Fisica atomica e nucleare, con un ultimo capitolo in cui vengono descritti importanti dispositivi impiegati

nelle Scienze medico-biologiche. Il lettore dispone così di una vasta panoramica (anche se necessariamente sintetica) della moderna strumentazione in uso nelle strutture sanitarie e nei laboratori di Biologia.

Scorrendo l'indice si può osservare che la Meccanica viene applicata ai sistemi biologici sia per quanto concerne le strutture solide (Biomeccanica), sia per quanto riguarda il movimento dei liquidi, per i quali la complessità dei fenomeni ha indotto l'Autore ad applicare il metodo delle approssimazioni successive per giungere a una loro (quasi) esauriente comprensione. Successivamente vengono trattati i fenomeni in cui interviene il calore (Termodinamica dei sistemi biologici) e gli scambi di sostanze attraverso le membrane biologiche. Questi scambi, avendo poi introdotto le nozioni relative ai fenomeni elettrici, portano allo studio della propagazione di segnali elettrici nelle strutture biologiche. Dopo aver trattato la Fisica dei fenomeni ondulatori in generale, sono considerate le loro applicazioni nel caso di onde meccaniche (suono) e di onde elettromagnetiche, sempre in relazione ai sistemi biologici e alla strumentazione biomedicale. In seguito vengono trattate la struttura della materia, le radiazioni corpuscolari ed elettromagnetiche e le conseguenze delle radiazioni sull'uomo con le relative applicazioni diagnostiche e terapeutiche, aggiornate ai più recenti sviluppi tecnologici. L'ultimo capitolo svolge un argomento tecnico-applicativo (strumentazione biomedicale), richiamando le nozioni di base svolte nei capitoli precedenti (di particolare utilità nell'ambito delle Scuole di Specializzazione di Medicina).

A conclusione, si può osservare che, non essendo realistico che un Corso di insegnamento possa coinvolgere tutta la materia sviluppata in questo testo, si è cercato di fornire uno strumento della massima flessibilità, sia per il Docente che può ritagliare un programma del Corso con la scelta di argomenti e applicazioni ritenute più opportune, sia per lo Studente che può impiegare il testo come un utile manuale di riferimento per altri Corsi, per le eventuali Scuole di Specializzazione e per la sua carriera futura.

Ringrazio il Prof. G. Bellodi, il Prof. A. Piazzoli, il Dott. E. Giroletti, il Prof. A. Ottolenghi, il Dott. L. Di Giulio, il Dott. C. Aprile, il Prof. F. Calliada, il Prof. A. Calligaro, il Prof. A. Casasco per le utili discussioni, per i suggerimenti e per il materiale necessario in alcune trattazioni specialistiche.

D. Scannicchio
Docente di Fisica Medica
Corso di Laurea in Medicina e Chirurgia
Università degli Studi di Pavia

Prefazione alla II edizione

Oltre all'aggiunta e messa a punto di alcune nozioni, in questa seconda edizione è stata accentuata la separazione fra la Fisica di base (colore verde) e le applicazioni biomediche (colore rosso). In particolare sono stati aggiunti un ulteriore capitolo di Meccanica (Capitolo 3) e un ulteriore capitolo sulle Onde Meccaniche (Capitolo 16), mentre alcuni paragrafi di Fisica di base sono stati spostati nei capitoli ad essi relativi.

Il testo, inoltre, è stato snellito trasferendo l'ultimo capitolo (Strumentazione biomedica) in rete in versione elettronica, consultabile e stampabile dal singolo utente: in effetti gli argomenti svolti in questo capitolo fanno da corollario alla Fisica Biomedica e la sua consultazione dipende dall'indirizzo scelto dallo studente.

te o dal medico laureato. Per di più la versione elettronica permette un continuo aggiornamento delle tematiche svolte nel capitolo, aspetto oggi di particolare importanza alla luce del continuo progresso tecnologico.

Prefazione alla III edizione

Questa III edizione è nata dall'esigenza di approfondire e sviluppare soprattutto le nozioni di Meccanica, in relazione alle loro applicazioni biomedicali: infatti la Meccanica è stata ampliata in tre capitoli, accentuando la separazione tra la Meccanica traslatoria e quella rotatoria.

Sempre con l'intento di razionalizzare la Meccanica e le sue applicazioni, i capitoli riguardanti le vibrazioni meccaniche (fenomeni ondulatori in generale e in particolare le onde elastiche e le loro conseguenze) sono stati anticipati, svolgendo una linea continua dalle nozioni di Meccanica di base ai relativi sviluppi nella Fluidodinamica, nella Termodinamica e nelle oscillazioni meccaniche.

Per favorire la comprensione degli argomenti svolti nel volume, il contenuto di alcune Appendici è stato anticipato nel primo capitolo (calcolo vettoriale e nozioni condensate di Analisi matematica).

Sempre allo scopo di una maggiore razionalizzazione e completezza, alcuni capitoli sono stati divisi e alcuni paragrafi sono stati aggiunti e/o spostati in capitoli maggiormente attinenti all'argomento trattato. Le nozioni di approfondimento, non strettamente indispensabili alla comprensione di argomenti successivi, sono state aggiunte e isolate in Note fuori testo (riquadri in verde). Inoltre nel volume sono state introdotte ulteriori esemplificazioni medico-biologiche, problemi e figure. Anche l'indice è stato ampliato dettagliandolo in Esempi, Note e Problemi al fine di permettere un veloce reperimento di argomenti di particolare interesse.

Infine, l'ultimo capitolo, come in precedenza disponibile scaricandolo dalla rete, è stato aggiornato e completato, in particolare con l'introduzione della tomografia oculare, dei dispositivi impiegati nella Chirurgia robotica e della macchina cuore-polmone per la circolazione extracorporea. A sottolineare l'importanza di questo capitolo, che fa riferimento alle nozioni di Fisica di base e di Fisica applicata contenute nel testo, è stato riportato, qui di seguito, l'elenco completo della numerosa strumentazione e delle tecniche biomedicali trattate nel volume.

Si ringraziano i docenti del Corso di Fisica medica professori Sergio Abbate (Università di Brescia), Laura Franca Cantù e Elena Del Favero (Università di Milano), Salvatore Basile (Università di Palermo), i cui consigli, le proficue discussioni critiche e i suggerimenti su vari dettagli hanno permesso di avviare la stesura di questa edizione.

Si ringraziano inoltre i professori, dell'Università di Pavia e/o dell'IRCCS San Matteo di Pavia, Franco Benazzo (Ortopedia), Roberto Bottinelli e Vittorio Ricci (Fisiologia umana), Fabrizio Calliada (Radiologia), Elio Giroletti (Fisica), Andrea Pietrabissa (Chirurgia), Sandro Rossi (Clinica medica) per gli utili suggerimenti e discussioni e per aver fornito materiale di aggiornamento.

Prefazione alla IV edizione

La nuova edizione di **Fisica Biomedica** è stata snellita, in maniera equilibrata e concisa, trasferendo molti approfondimenti nella versione digitale: Esempi, Note, Paragrafi, ovvero tutte quelle parti che arricchivano il testo, ma nello stesso tempo impedivano la conseguenzialità degli argomenti trattati nei vari Capitoli (dimostrazioni fisico-matematiche, curiosità e applicazioni biologiche), sono ora raccolte negli *Ulteriori approfondimenti in ebook*. Questi approfondimenti vengono adeguatamente segnalati lungo il testo dall'icona .

Il testo, oltre a perfezionamenti esplicativi e alla correzione di errori, è stato aggiornato con le recenti delibere circa le unità di misura fondamentali del Sistema Internazionale e con gli attuali provvedimenti legislativi in materia di radioprotezione, per i quali ultimi ringrazio la consulenza del prof. Elio Giroletti del Dipartimento di Fisica dell'Università di Pavia.

Si è inoltre provveduto ad aggiungere particolari e interessanti argomenti quali l'esistenza in Natura di molecole alternative all'emoglobina (Capitolo 15), cenni sulla fluidodinamica del sistema linfatico (Capitolo 16) e lo studio fisico-matematico della diffusione del glucosio e dell'urea nel sangue (Paragrafo E15.1, associato al Capitolo 15 e consultabile negli Ulteriori approfondimenti in ebook).

Hanno collaborato alla precedente edizione:

Gastone Castellani, Alberto Fenzi, Raffaele Tommasi

Elenco della strumentazione e delle tecniche e metodologie fisiche descritte o citate nel testo

TECNICHE STRUMENTALI	SCOPO	CONSULTABILE IN
• Acceleratore lineare	: radioterapia con elettroni e gamma	E24
• Adroterapia	: radioterapia con protoni, neutroni e ioni	p. 505
• Amplificatore di brillanza	: immagini RX intensificate	p. 480
• Analisi di Fourier o armonica	: metodo analisi segnali	p. 229
• Polarimetro	: misura concentrazione soluzioni	p. 422
• Aspirazione di Bunsen	: aspirazione gas da depressione	p. 120
• Betatrone	: acceleratore di elettroni (radioterapia)	E24
• Bilancia e metodo doppia pesata	: misura della massa di un corpo	p. 66
• Bisturi criogenico	: resezione tessuti	E11
• Bisturi elettrico	: resezione tessuti	E20
• Bisturi laser	: resezione tessuti	p. 458
• BNCT (Boron Neutron Capture Therapy)	: radioterapia con neutroni e attivazione	p. 510
• Bomba calorimetrica	: misura di calore di combustione	p. 206
• Brachiterapia	: terapia mediante inserimento radioisotopi	p. 506
• Calcolatore e conversione AD	: calcolo e conversione analogica-digitale	p. B-3
• Calorimetro delle mescolanze	: misura del calore	p. 206
• Camera di ionizzazione (Geiger-Müller)	: misura di radiazioni	E26
• Carrucola	: trazione in ortopedia	p. 66, E5
• CCD (Charge Coupled Device)	: immagini digitali	p. 541
• Cellule fotoelettriche	: rivelazione luce	p. 532
• Centrifuga analitica	: misura peso molecolare	p. 168
• Centrifuga preparativa	: separazione componenti soluzione	p. 168
• Ciclotrone	: acceleratore protoni	E24
• Circuiti oscillanti	: generazione di onde elettromagnetiche	p. 397
• Cobaltoterapia	: radioterapia gamma	p. 506
• Contagoccie	: dosare medicinali liquidi	p. 112
• Cuore-polmone (macchina)	: circolazione extracorporea	p. 619
• Datazione (con radionuclidi)	: misura età reperti	p. 452
• Densitometria ossea	: misura densità calcio nelle ossa	p. 500
• Defibrillatore	: reset ciclo elettrocardiografico	p. 392
• Diatermia	: terapia con generazione calore	p. 458
• Dosimetria	: misure dose radiazioni ionizzanti	p. 484
• Ecografia ed ecocardiografia	: misure e immagini con ultrasuoni	p. 559
• Ecotomografia	: immagini tomografiche con ultrasuoni	p. 570, 608
• Elettrocardiografia	: segnali elettrici cardiaci	p. 372, 549
• Elettrodi e microelettrodi	: misura di potenziali elettrici	p. 529
• Elettroencefalografia	: segnali elettrici cerebrali	p. 233, p. 372
• Elettroforesi	: misura proteine liquidi biologici	p. 163
• Emodialisi (rene artificiale)	: filtrazione artificiale del sangue	p. 576
• Endoscopia	: immagini da cavità interne	E22
• Flottazione	: galleggiamento da tensione superficiale	p. 107
• Flussimetria (tubo di Pitot)	: misura di portata e di velocità fluido	p. 120
• Flussimetria (tubo di Venturi)	: misura di portata e di velocità fluido	p. 120
• Flussimetria Doppler	: misura della velocità del sangue	p. 267
• Flussimetria elettromagnetica	: misura di portata	p. 532

• Flussimetria mediante diluizione	: misura di portata	p. 533
• Flussimetria mediante termodiluizione	: misura di portata	p. 534
• Fotomoltiplicatori	: rivelatori di radiazione e particelle	E26
• Gamma knife	: radioterapia gamma concentrata	p. 506
• Generatori di potenziale elettrico	: creazione di potenziali e correnti elettriche	p. 333
• HIFU (High Intensity Focused Ultrasound)	: ablazione con ultrasuoni focalizzati	p. 266
• IMRT (Intensity Modulated Radiation Therapy):	radioterapia con elettroni e raggi X	p. 508
• Intensificatore d'immagine	: immagini alto contrasto raggi X	p. 480
• IORT (IntraOperative Radiation Therapy)	: acceleratore per radioterapia intraoperatoria	p. 509
• Laser e applicazioni	: interventi chirurgici	p. 460
• Litotripsia renale	: distruzione calcoli renali	p. 571
• Litotripsia calcolosi biliare	: distruzione calcoli biliari	p. 571
• Litotripsia (onde d'urto) in ortopedia	: distruzione concrezioni articolari	p. 571
• Macchina cuore-polmone	: circolazione extracorporea	p. 619
• Mammografia	: immagini mammografiche con RX	p. 479
• Manometro a liquido	: misura della pressione	p. 135
• Metabolismo basale	: misura consumo energetico	p. 211
• Microscopia a fluorescenza	: immagini microscopiche da fluorescenza	E22
• Microscopia digitale	: immagini microscopiche digitalizzate	E22
• Microscopia a raggi X	: studio reticolari cristallini	E22
• Microscopio semplice	: lente ingrandimento	p. 426
• Microscopio composto	: immagini microscopiche nel visibile	p. 427
• Microscopio a contrasto di fase	: immagini da interferenze	E22
• Microscopio elettronico	: immagini a grande ingrandimento	p. 543
• Microscopio polarizzatore	: immagini in luce polarizzata	E22
• MOC (Mineralogia Ossea Computerizzata)	: misura calcio osseo	p. 500
• Onda sfigmica	: misura della velocità dell'onda sfigmica	p. 146
• Optical Coherence Tomography (OCT)	: immagini tomografiche della retina	p. 582
• Osmometri	: misura della pressione osmotica	E16
• Ossimetria	: misura concentrazione ossigeno nel sangue	p. 425
• Pendolo	: misura di frequenza	E3, E4
• PET (Positron Emission Tomography)	: immagini da radioisotopi , + emittenti	p. 582, 593
• pHmetri	: misura di pH (acidità)	p. 542
• Pletismografia a impedenza	: misure di portata (flusso)	p. 534
• Polarimetro	: misure di concentrazione	p. 422
• Polarizzazione (polaroid, Nicol, riflessione)	: formazione di luce polarizzata	E21
• Radiografia	: immagini da raggi X	p. 478
• Radioscopia	: immagini da raggi X	p. 477
• Radioterapia conformazionale	: radioterapia sulla forma del tumore	p. 507
• RM (Risonanza Magnetica)	: immagini tomografiche da radiofrequenza	p. 587, 600
• Robot chirurgici	: esecuzione di interventi chirurgici	p. 612
• Scambiatore di calore in controflusso	: scambio calore	p. 216
• Scintigrafia	: immagini da emissione di radiazione	p. 502
• Sfigmomanometro	: misura della pressione arteriosa	p. 135
• Scintillazione (rivelatori)	: rivelatori di radiazione ionizzante	E26
• Sedimentazione	: misura di velocità di sedimentazione	p. 161
• Shock elettrico (protezione)	: evitare lo shock elettrico	522

• Sincrotrone	: accelerazione di particelle cariche	E24
• SPECT (Single Photon Emission CT)	: immagini da radioisotopi gamma emettenti	p. 582, 593
• Spettrofotometria	: individuazione di composti chimici	p. 423
• Spettrometria di massa	: individuazione di nuclei (isotopi)	E24
• Spettroscopia ottica	: individuazione di atomi	p. 408
• Spirometria	: misura di volumi polmonari	p. 211, E7
• Sterilizzazione con radiazione gamma	: sterilizzazione materiali	p. 497
• Stetoscopio	: valutazione suoni cardiaci e polmonari	p. 263
• Stimolatore cardiaco (pacemaker)	: stimolazione periodica cardiaca	p. 341
• TBI (Total Body Irradiation)	: radioterapia su tutto il corpo	p. 507
• TC (Tomografia Computerizzata)	: immagini tomografiche con raggi X	p. 582, 587
• Tensione superficiale (dispositivo di misura)	: misura di tensione superficiale nei liquidi	p. 108
• Terapia conformazionale 3D	: radioterapia sulla forma 3D del tumore	p. 507
• Terapia a radiofrequenza (RF)	: distruzione di tessuti	p. 457
• Termografia	: immagini termiche (a infrarossi)	p. 460
• Termoluminescenza	: misura di dosi di radiazione ionizzante	E26
• Termometria	: misura di temperatura	p. 173
• Torchio idraulico	: applicazione di elevate pressioni	p. 93
• Termocoppia e termoresistori	: misura di temperatura	p. 540
• Trasduttori chimici	: misura di pressione parziale di O ₂ e CO ₂	p. 542
• Trasduttori di portata	: misure di portata	p. 539
• Trasduttori di pressione	: misure di pressione	p. 532
• Trasduttori ottici	: trasformazione luce-corrente elettrica	p. 540
• Trasformatore di d.d.p.	: passaggio alti-bassi voltaggi e viceversa	p. 389, p. 392
• Tubo a raggi X	: produzione di raggi X	p. 466
• Ultrasuoni in terapia	: impiego degli ultrasuoni in terapia	p. 266
• Vasi Dewar	: contenitori isolanti	p. 206
• VES	: misura di Velocità di Eritro-Sedimentazione	p. 162
• Viscosimetria	: misura della viscosità di liquidi	p. 101

I termini in blu fanno riferimento al Capitolo 28 , all'Appendice B  e agli Ulteriori approfondimenti in ebook 

IMPORTANTE: Si invita il lettore a prendere visione preliminare delle indicazioni utili alla lettura, riportate in basso.

INDICAZIONI UTILI ALLA LETTURA

- ✓ *Il testo si articola in Capitoli differenziati con indicatore quadrato verde per le nozioni di Fisica di base e rosso per le applicazioni medico-biologiche.*
- ✓ *Le espressioni formali rilevanti o conclusive sono riportate in riquadro giallo (azzurro nelle Appendici).*
- ✓ *Gli esempi con calcolo numerico nel testo sono separati dalla trattazione e introdotti alla fine dell'argomento trattato nel paragrafo.*
- ✓ *Le didascalie delle figure sono spesso utilizzate per fornire ulteriori dettagli/nozioni complementari al testo.*
- ✓ *Alla fine di ogni capitolo è riportato un riepilogo delle grandezze fisiche (e loro unità di misura) introdotte in esso.*
- ✓ *Alla fine di ogni capitolo sono proposti quesiti e problemi il cui risultato è riportato nell'Appendice D.*
- ✓ *Le Appendici richiamano e/o introducono nozioni utili nella trattazione e riprendono ed estendono le Tabelle riportate nel testo.*
- ✓ *Il testo, le figure e le didascalie adottano la seguente simbologia:*
 - *le grandezze vettoriali sono riportate in grassetto (grassetto corsivo solo per posizione, spostamento (o distanze), velocità e accelerazione);*
 - *le grandezze scalari o il modulo di vettori sono riportate con carattere normale corsivo.*
- ✓ *Il Capitolo 28 (Strumentazione Biomedica) l'Appendice A (Cenni di teoria della misura e di statistica) e l'Appendice B (Cenni di informatica) sono disponibili sia nell'Area riservata , nel formato Adobe Acrobat PDF e scaricabili gratuitamente, sia nella versione ebook. Per accedere a questi contenuti bisogna collegarsi al sito www.edisesuniversita.it e seguire le istruzioni riportate nella prima pagina del libro.*
- ✓ *Come riportato nella Prefazione alla IV edizione, in quasi tutti i Capitoli sono presenti locandine (sfondo arancione) che inviano il lettore agli Ultimi approfondimenti in ebook , a cui si accede collegandosi al sito www.edisesuniversita.it e seguendo le istruzioni riportate nella prima pagina del libro.*
- ✓ *La numerazione di Paragrafi, Esempi, Note, formule e figure precedute dalla lettera E presenti nel testo cartaceo riguardano gli approfondimenti in ebook.*

Indice generale

Prefazione alla I edizione
Prefazione alla II edizione
Prefazione alla III edizione
Prefazione alla IV edizione
Indicazioni utili alla lettura

Capitolo 1

Le grandezze fisiche e la loro misura. Cenni di Geometria e di Analisi matematica

1.1 LA FISICA APPLICATA ALLA MEDICINA E ALLA BIOLOGIA	1
1.2 INTRODUZIONE	2
1.3 DEFINIZIONE DI UNA GRANDEZZA FISICA E SUE DIMENSIONI	2
1.4 SISTEMI DI UNITÀ DI MISURA E COSTANTI FONDAMENTALI	3
1.5 GRANDEZZE SCALARI E GRANDEZZE VETTORIALI	6
1.5a Somma e differenza di vettori	7
1.5b Prodotto scalare e prodotto vettoriale	8
1.5c Il vettore gradiente	10
1.5d Flusso di un vettore attraverso una superficie	11
<i>Esempio 1.1 Somma di vettori</i>	12
<i>Esempio 1.2 Prodotto vettoriale e prodotto scalare</i>	12
1.6 CENNI DI GEOMETRIA E DI ANALISI MATEMATICA	12
1.6a Angolo solido	13
1.6b Il concetto di funzione e sua rappresentazione grafica	15
1.6c La funzione lineare e le sue proprietà	16
<i>Esempio 1.3 Moto rettilineo uniforme</i>	17
1.6d La funzione esponenziale le sue proprietà	17
<i>Esempio 1.4 Sviluppo di colonie batteriche</i>	19
1.6e Le funzioni trigonometriche	19
<i>Esempio 1.5 Risoluzione di triangoli</i>	22
1.6f La derivata: significato, proprietà e conseguenze	22
<i>Esempio 1.6 Derivata della funzione esponenziale</i>	24

III	1.6g L'integrale: significato e proprietà	25
IV	1.6h Equazioni differenziali	27
V	<i>Esempio 1.7 Equazione delle onde di d'Alembert</i>	29
VI	1.7 CENNI DI METODOLOGIA DELLA MISURA E DI TEORIA DELL'ERRORE	29
X	<i>Riepilogo delle grandezze fisiche e unità di misura</i>	29



APPROFONDIMENTI

Esempio E1.1 Valutazione di angoli solidi

Esempio E1.2 Centro di massa di un semianello omogeneo

1

2

3

Capitolo 2

I fondamenti della Meccanica

Parte I: Le basi della Cinematica e della Dinamica traslatoria

2.1 INTRODUZIONE	31
2.2 CINEMATICA	31
2.2a Traiettoria e legge oraria	31
2.2b Velocità e accelerazione	32
2.2c Legge oraria di alcuni semplici moti	33
<i>Esempio 2.1 Legge oraria: moto rettilineo uniformemente accelerato</i>	37
<i>Esempio 2.2 Moto circolare uniforme</i>	38
2.3 LE FORZE E LE LEGGI DELLA DINAMICA	38
2.3a Le forze	38
2.3b I principi della Dinamica traslatoria	38
2.4 IL TEOREMA DELL'IMPULSO	41
<i>Esempio 2.3 Il teorema dell'impulso</i>	41
2.5 RELATIVITÀ GALILEIANA	42
2.6 I CAMPI DI FORZE: IL CAMPO GRAVITAZIONALE	42
<i>Esempio 2.4 Forza gravitazionale tra due protoni nel nucleo dell'atomo</i>	44
<i>Esempio 2.5 2° principio della Dinamica</i>	44
2.7 MASSA, PESO E DENSITÀ	45
2.8 PSEUDOFORZE	46
<i>Riepilogo delle grandezze fisiche e unità di misura</i>	47

 Capitolo 3

I fondamenti della Meccanica
Parte II: Applicazioni della Dinamica traslatoria

3.1 INTRODUZIONE

3.2 DALLE FORZE ALLA LEGGE ORARIA

- 3.2a Integrazione dell'equazione di moto
- 3.2b Moto inerziale in assenza di forze
- 3.2c Moto in un campo di forze uniforme

Esempio 3.1 Moto parabolico

- 3.2d Moto in un campo di forze centrali
- 3.2e Moto in un campo di forze elastiche (moto armonico)

3.3 LAVORO, ENERGIA E POTENZA

- 3.3a Energia cinetica e teorema dell'energia cinetica
- 3.3b Campi conservativi, energia potenziale e conservazione dell'energia meccanica
- 3.3c Potenza e rendimento
- 3.3d Energia potenziale e forze: condizioni di equilibrio di un sistema meccanico
- 3.3e Piccole oscillazioni intorno alla posizione di equilibrio stabile

*Esempio 3.2 Conservazione dell'energia meccanica**Esempio 3.3 Conservazione dell'energia e forza elastica**Riepilogo delle grandezze fisiche e unità di misura*
 **APPROFONDIMENTI**

E3.1 MECCANICA DI SISTEMI FISICI

- E3.1a Il piano inclinato

Esempio E3.1 Moto sul piano inclinato

- E3.1b Il pendolo

Esempio E3.2 Moto del pendolo

E3.2 MOTO DI UN PROIETTILE

Esempio E3.3 Lancio del giavellotto

E3.3 COLLISIONI FRA CORPI

*Esempio E3.4 Urto centrale elastico**Esempio E3.5 Urto centrale anelastico*
 Capitolo 4

I fondamenti della Meccanica
Parte III: Elementi di Statica e di Dinamica rotatoria. Corpi deformabili e attrito

4.1 INTRODUZIONE

4.2 EQUILIBRIO DI UN CORPO RIGIDO

63

4.3 I VINCOLI E LE LEVE

64

4.4 CENTRO DI MASSA E BARICENTRO

67

Esempio 4.1 Centro di massa di due corpi

69

4.5 ELASTICITÀ E LEGGE DI HOOKE

69

4.6 LE FORZE DI ATTRITO

71

Esempio 4.2 Forze di attrito su un'auto vettura in curva

72

Riepilogo delle grandezze fisiche e unità di misura

72

51

52

 **APPROFONDIMENTI**

E4.1 CENNI DI DINAMICA DEL CORPO RIGIDO (TRASLATORIA E ROTATORIA)

*Esempio E4.1 Conservazione del momento angolare**Esempio E4.2 Traslazione e rotazione su un piano inclinato*
 Capitolo 5

Biomeccanica

5.1 INTRODUZIONE

75

5.2 EQUILIBRIO DI ARTICOLAZIONI

75

Esempio 5.1 Equilibrio dell'anca con ausilio del bastone

78

5.3 LE LEVE DEL CORPO UMANO

79

Esempio 5.2 Equilibrio del piede in sollevamento

81

Esempio 5.3 Equilibrio tronco-vertebrale

82

5.4 LEGGE DI HOOKE APPLICATA A FRATTURE OSSEE

83

Esempio 5.4 Sforzo compressivo nella caduta

83

5.5 LA FRATTURA DI OSSA

84

5.6 LA PERCEZIONE DEL MOTO ROTATORIO

84

Riepilogo delle grandezze fisiche e unità di misura

86

 **APPROFONDIMENTI**

E5.1 CARRUCOLE E PULEGGE IN MEDICINA

E5.2 LA MANDIBOLA NEGLI ANIMALI

E5.3 FLESSIONE DI UNA TRAVE E FRATTURE PER FLESSIONE

E5.4 TORSIONE DI UNA TRAVE E FRATTURE PER TORSIONE

Esempio E5.1 Frattura per torsione

E5.5 LA CONTRAZIONE MUSCOLARE

E5.6 LA MECCANICA DELLA LOCOMOZIONE

63

Capitolo 6

Meccanica dei fluidi

6.1 INTRODUZIONE	89	7.2 IL CIRCUITO IDRODINAMICO DEL SANGUE	115
<i>Esempio 6.1 Forza di pressione relativa</i>	90	7.2a Portata dei vasi e velocità del sangue	117
6.2 EQUILIBRIO NEI FLUIDI	90	7.2b Applicazioni del teorema di Bernoulli	119
<i>Esempio 6.2 Spinta di Archimede su un iceberg</i>	92	7.2c Misure di flusso	120
<i>Esempio 6.3 Pressione idrostatica</i>	92	<i>Esempio 7.1 Velocità del sangue</i>	121
<i>Esempio 6.4 Principio di Pascal</i>	93	<i>Esempio 7.2 Velocità e termine cinetico</i>	121
6.3 IL MOTO DEI FLUIDI: PORTATA ED EQUAZIONE DI CONTINUITÀ	93	7.3 VISCOSITÀ DEL SANGUE	121
<i>Esempio 6.5 Potenza da caduta d'acqua</i>	95	7.3a Composizione del sangue	121
6.4 FLUIDI NON VISCOSI: IL TEOREMA DI BERNOULLI	95	7.3b Comportamento viscoso normale	122
6.5 FLUIDI VISCOSI: MOTO LAMINARE E MOTO TURBOLENTO	97	7.3c Anomalie della viscosità del sangue	122
6.6 MISURA DELLA VISCOSITÀ. VISCOSIMETRI	101	7.4 RESISTENZA DEI VASI E VARIAZIONE DI PRESSIONE NEL SISTEMA CIRCOLATORIO	124
6.7 MOTO NON STAZIONARIO DI FLUIDI	102	7.4a Resistenza dei vasi	125
6.8 FORZE DI COESIONE E TENSIONE SUPERFICIALE	102	7.4b Resistenza e regimi di moto nel sistema circolatorio	127
6.9 APPLICAZIONI DELLA TENSIONE SUPERFICIALE	105	<i>Esempio 7.3 Resistenza del circolo complessivo</i>	128
6.9a Contatto fluido-fluido	105	7.4c Effetto della pressione idrostatica	128
6.9b Flottazione	105	7.5 LAVORO E POTENZA CARDIACA	129
<i>Esempio 6.6 Galleggiamento di un insetto</i>	106	7.5a La pompa cardiaca	129
<i>Esempio 6.7 Flottazione di una moneta sull'acqua</i>	107	7.5b Il ciclo cardiaco	131
6.9c Liquidi tensioattivi	107	7.5c Calcolo del lavoro e della potenza cardiaca	132
6.9d Fenomeni di capillarità	108	<i>Esempio 7.4 Lavoro cardiaco</i>	134
<i>Esempio 6.8 Innalzamento capillare da tensione superficiale</i>	109	<i>Esempio 7.5 Fattore cinetico</i>	135
6.10 TENSIONE ELASTICA DI UNA MEMBRANA E FORMULA DI LAPLACE	109	7.6 MISURA DELLA PRESSIONE DEL SANGUE	135
<i>Esempio 6.9 Tensione elastica di un palloncino di gomma</i>	111	<i>Riepilogo delle grandezze fisiche e unità di misura</i>	137
6.11 IL CONTAGOCCE	112		
<i>Riepilogo delle grandezze fisiche e unità di misura</i>	112		

APPROFONDIMENTI

NOTA E6.1 DEDUZIONE DELLE CARATTERISTICHE DEL REGIME LAMINARE:	
Formula di Poiseuille e profilo parabolico della velocità delle lame	

Capitolo 7

Meccanica dei fluidi nei sistemi biologici

7.1 INTRODUZIONE	115
------------------	-----

Capitolo 8

Distensibilità e pulsatilità

8.1 INTRODUZIONE	139
8.2 APPLICAZIONI DELLA TENSIONE SUPERFICIALE AI SISTEMI BIOLOGICI	139
8.2a Effetti della tensione superficiale in Biologia: il plastron e la salita della linfa nei vegetali	139
<i>Esempio 8.1 Salita della linfa negli alberi</i>	140

8.2b Embolia gassosa	140	 Capitolo 10	
<i>Esempio 8.2 Rottura della membrana cellulare</i>	141		
8.3 CARATTERISTICHE ELASTICHE DELLE PARETI DEI VASI	142	Termologia e Termodinamica	
8.4 RAGGIO DI EQUILIBRIO DEI VASI	142	10.1 INTRODUZIONE	171
8.5 EFFETTI IDRODINAMICI DELLA DISTENSIBILITÀ DEI VASI	144	10.2 SISTEMA E STATO TERMODINAMICI	172
8.5a Considerazioni generali	144	10.3 TEMPERATURA E SCALE TERMODINAMICHE	173
<i>Esempio 8.3 Velocità dell'onda sfigmica</i>	146	10.4 ENERGIA INTERNA	174
8.5b Moto pulsatile e impedenza meccanica	147	10.5 CALORE E CALORE SPECIFICO	174
8.6 FORMULA DI LAPLACE E FUNZIONALITÀ CARDIACA	151	<i>Esempio 10.1 Equilibrio termico</i>	177
8.7 FORMULA DI LAPLACE ED EQUILIBRIO ALVEOLARE	154	10.6 IL LAVORO IN TERMODINAMICA	177
<i>Esempio 8.4 Equilibrio alveolare</i>	156	10.7 TRASFORMAZIONI TERMODINAMICHE	178
<i>Riepilogo delle grandezze fisiche e unità di misura</i>	157	10.8 LA CONSERVAZIONE DELL'ENERGIA IN TERMODINAMICA: PRIMO PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA	180
 APPROFONDIMENTI		10.9 I GAS PERFETTI	181
E8.1 MODELLI ANALOGICI DEL CUORE E DEI VASI		<i>Esempio 10.2 Riduzione a condizioni NTP</i>	184
E8.2 FORMULA DI LAPLACE E ANATOMIA DEI VASI		10.10 CENNI SULLA TEORIA CINETICA DEI GAS IDEALI	184
<i>Esempio E8.1 Forza centrifuga e volta arco aortico</i>		10.11 I GAS REALI	186
 Capitolo 9		10.12 ENTALPIA	187
Trasporto in regime viscoso		10.13 IL SECONDO PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA	189
9.1 INTRODUZIONE	159	<i>Esempio 10.3 Rendimento di una macchina termica</i>	190
9.2 SEDIMENTAZIONE	161	10.14 ENTROPIA	191
<i>Esempio 9.1 Determinazione della VES</i>	162	<i>Esempio 10.4 Variazione di entropia</i>	194
9.3 ELETTROFORESI	163	<i>Esempio 10.5 Variazione di entropia di un gas perfetto in espansione libera</i>	194
<i>Esempio 9.2 Elettroforesi di plasma umano</i>	165	10.15 SIGNIFICATO STATISTICO DELL'ENTROPIA	195
9.4 CENTRIFUGAZIONE	165	10.16 I POTENZIALI TERMODINAMICI: ENERGIA LIBERA	195
<i>Esempio 9.3 Misura del peso molecolare dell'albumina</i>	167	<i>Esempio 10.6 Processi spontanei e processi vietati</i>	198
9.5 CENTRIFUGHE PREPARATIVE E CENTRIFUGHE ANALITICHE	168	10.17 IL POTENZIALE CHIMICO ED EQUILIBRI CON SCAMBI DI PARTICELLE	198
<i>Riepilogo delle grandezze fisiche e unità di misura</i>	169	<i>Riepilogo delle grandezze fisiche e unità di misura</i>	200



E9.1 DISTRIBUZIONE DELLA CONCENTRAZIONE ALL'EQUILIBRIO

Esempio E9.1 Misura sperimentale del numero di Avogadro N_A (1914)



E10.1 TRASFORMAZIONI TERMODINAMICHE DEI GAS PERFETTI

- E10.1a Trasformazioni isoterme
- E10.1b Trasformazioni isobare e isocore.
Relazione di Meyer

E10.1c Trasformazioni adiabatiche

*Esempio E10.1 Energia cinetica e velocità delle molecole**Esempio E10.2 Relazione fra energia cinetica media delle molecole e temperatura*

E10.2 POTENZIALI TERMODINAMICI DEI GAS PERFETTI

Capitolo 11

Termodinamica nei sistemi biologici

11.1	INTRODUZIONE	201
11.2	MECCANISMI DI TRASMISSIONE DEL CALORE	201
11.2a	Convezione del calore	201
11.2b	Conduzione del calore	202
<i>Esempio 11.1 Conduzione di calore e variazione di entropia</i>		203
11.2c	L'irraggiamento termico	203
<i>Esempio 11.2 Irraggiamento dal corpo umano</i>		205
11.3	VASI DI DEWAR E CALORIMETRIA	206
<i>Esempio 11.3 Scambio di calore tra due masse d'acqua e variazione di entropia</i>		207
11.4	I PRINCIPI DELLA TERMODINAMICA E LA FISIOLOGIA	207
11.5	METABOLISMO DEL CORPO UMANO	209
<i>Esempio 11.4 Perdita di massa corporea</i>		211
11.6	METABOLISMO BASALE E SPIROMETRIA	211
<i>Esempio 11.5 Valutazione del tasso metabolico</i>		214
11.7	TERMOREGOLAZIONE DEGLI ANIMALI A SANGUE CALDO	215
11.7a	Ambiente freddo	216
11.7b	Ambiente caldo	217
11.7c	Ambiente molto secco o molto umido	217
<i>Esempio 11.6 Termoregolazione del corpo umano</i>		218
11.8	POTENZIALI TERMODINAMICI E REAZIONI BIOCHIMICHE	219
<i>Esempio 11.7 Velocità di sintesi dell'ATP</i>		219
<i>Riepilogo delle grandezze fisiche e unità di misura</i>		220

 APPROFONDIMENTI

NOTA E11.1 BISTURI CRIOGENICO

E11.1 METABOLISMO BASALE E DIMENSIONI DEGLI ESSERI VIVENTI

E11.2 EQUILIBRI NELLE REAZIONI CHIMICHE

E11.3 ENTROPIA E VITA

Capitolo 12

Fenomeni ondulatori

12.1	INTRODUZIONE	221
12.2	LE ONDE	222
12.3	MOTO ARMONICO E OSCILLATORE ARMONICO	223
12.4	OSCILLAZIONI SMORZATE E FORZATE	224
<i>Esempio 12.1 Conservazione dell'energia e onde smorzate</i>		225
12.5	EQUAZIONE DI PROPAGAZIONE DI UN'ONDA	225
<i>Esempio 12.2 Vibrazione di una corda</i>		227
12.6	ONDE PIANE, ONDE SFERICHE E PRINCIPIO DI HUYGENS	227
12.7	ANALISI DI FOURIER	229
<i>Esempio 12.3 Frequenze armoniche nel pianoforte</i>		232
<i>Esempio 12.4 Analisi armonica dell'EEG</i>		233
12.8	RIFLESSIONE, RIFRAZIONE E RIFLESSIONE TOTALE	235
12.9	INTERFERENZA	237
12.10	ONDE STAZIONARIE E BATTIMENTI	239
12.10a	Onde stazionarie	239
12.10b	Battimenti	241
<i>Esempio 12.5 Battimenti</i>		242
12.11	EFFETTO DOPPLER	242
<i>Esempio 12.6 Suono da una sirena su un'automobile</i>		244
12.12	POLARIZZAZIONE DELLE ONDE TRASVERSALI	244
<i>Riepilogo delle grandezze fisiche e unità di misura</i>		245

 APPROFONDIMENTI

E12.1 EFFETTO DOPPLER RELATIVISTICO

Capitolo 13

Fisica delle onde elastiche

13.1	INTRODUZIONE	247
13.2	IL SUONO	247
13.3	PROPAGAZIONE DELLE ONDE SONORE	248
13.3a	Pressione sonora	248
13.3b	Velocità di propagazione dell'onda sonora	249
<i>Esempio 13.1 Velocità del suono in elio</i>		250
13.3c	Intensità sonora e direzionalità del suono	251
<i>Esempio 13.2 Suono da un altoparlante</i>		252

<i>Esempio 13.3 Intensità sonora a NTP</i>	252	15.4 DIFFUSIONE LIBERA E ATTRAVERSO MEMBRANE	278
<i>Esempio 13.4 Massima pressione sonora tollerabile</i>	252	<i>Esempio 15.2 Numero di pori e superfici di membrane biologiche (capillare e alveolare)</i>	282
13.4 INFRASUONI E ULTRASUONI	253	15.5 LA FILTRAZIONE	283
<i>Esempio 13.5 Effetto di ultrasuoni sul moto di molecole</i>	255	<i>Esempio 15.3 Stima del raggio dei pori di membrane</i>	285
Riepilogo delle grandezze fisiche e unità di misura	255	15.6 EQUILIBRI GAS-LIQUIDO	285
 APPROFONDIMENTI		15.7 DIFFUSIONE DI GAS IN SISTEMI BIOLOGICI	287
E13.1 IMPEDENZA ACUSTICA		<i>Esempio 15.4 Ossigeno trasportato dall'emoglobina</i>	290
<i>Esempio E13.1 Riflessione e trasmissione</i>		<i>Esempio 15.5 Tempi di diffusione attraverso la membrana alveolare</i>	290
 Capitolo 14		15.8 ESISTONO IN NATURA ALTERNATIVE ALL'EMOGLOBINA?	293
Le onde elastiche in Biologia e Medicina		Riepilogo delle grandezze fisiche e unità di misura	295
14.1 INTRODUZIONE	257	 APPROFONDIMENTI	
14.2 LIVELLI DI SENSAZIONE SONORA	257	NOTA E15.1 DEDUZIONE DELLA 2 ^a LEGGE DI FICK	
<i>Esempio 14.1 Sensibilità sonora dell'orecchio</i>	260	E15.1 DIFFUSIONE DEL GLUCOSIO E DELL'UREA	
14.3 LA RICEZIONE DI ONDE ELASTICHE NEI SISTEMI BIOLOGICI	260	 Capitolo 16	
14.4 LO STETOSCOPIO	263	Osmosi e applicazioni ai sistemi biologici	
14.5 IMPIEGO DEGLI ULTRASUONI IN MEDICINA	265	16.1 INTRODUZIONE	297
14.5a Gli ultrasuoni nella terapia medica	266	16.2 MEMBRANE SEMIPERMEABILI ED EQUILIBRI OSMOTICI	297
14.5b Gli ultrasuoni nella diagnostica medica	266	16.3 LAVORO OSMOTICO E POTENZIALE CHIMICO	300
<i>Esempio 14.2 Flussimetria Doppler</i>	268	16.4 EQUILIBRI OSMOTICI NEI SISTEMI BIOLOGICI	302
Riepilogo delle grandezze fisiche e unità di misura	268	<i>Esempio 16.1 Risalita per osmosi della linfa negli alberi</i>	303
 APPROFONDIMENTI		<i>Esempio 16.2 Accumulo di liquidi nei tessuti (edema)</i>	307
E14.1 TEORIA DI HELMHOLTZ		<i>Esempio 16.3 Lavoro osmotico per concentrare l'urea e metabolismo renale</i>	307
E14.2 LA FONAZIONE		16.5 SCAMBIATORE E MOLTIPLICATORE OSMOTICO IN CONTROFLUSSO	308
E14.3 INFRASUONI DA FENOMENI NATURALI E DA FONTI ARTIFICIALI		<i>Esempio 16.4 Recupero di acqua e soluti dai tubuli renali</i>	310
<i>Esempio 14.1 Sensibilità sonora dell'orecchio</i>		16.6 FLUIDO-DINAMICA DEL SISTEMA LINFATICO	311
E14.4 ULTRASUONI IN NATURA		Riepilogo delle grandezze fisiche e unità di misura	313
 Capitolo 15		 APPROFONDIMENTI	
Diffusione e filtrazione		NOTA E16.1 SPIEGAZIONE DELL'OSMOSI	
15.1 INTRODUZIONE	271		
15.2 LE MEMBRANE NEI SISTEMI BIOLOGICI	272		
15.3 IL FENOMENO DELLA DIFFUSIONE	275		
<i>Esempio 15.1 Numero di collisioni tra molecole</i>	278		

Capitolo 17

Fenomeni elettrici

- 17.1 INTRODUZIONE
- 17.2 CARICA ELETTRICA E FORZA DI COULOMB
- Esempio 17.1 Repulsione elettrostatica tra protoni*
- 17.3 IL CAMPO ELETTRICO E IL POTENZIALE ELETTROSTATICO
- 17.4 IL TEOREMA DI GAUSS E LE SUE CONSEGUENZE
- 17.5 DISTRIBUZIONI DI CARICHE ELETTRICHE: DIPOLO ELETTRICO E STRATO DIPOLARE
- 17.6 LA CAPACITÀ DI UN CONDUTTORE. IL CONDENSATORE
- Esempio 17.2 Energia di carica e scarica del condensatore*
- 17.7 LA CORRENTE ELETTRICA E LE LEGGI DI OHM
- 17.8 SOLUZIONI ELETTROLITICHE E DISSOCIAZIONE ELETTROLITICA
- Esempio 17.3 Soluzioni elettrolitiche*
- Esempio 17.4 Concentrazione di ioni idrogeno nell'acqua pura e pH*
- 17.9 LA MOBILITÀ ELETTROLITICA E L'ELETTROLISI
- 17.10 FORZA ELETTROMOTRICE E CIRCUITI IN CORRENTE CONTINUA
- 17.11 EFFETTO TERMICO DELLA CORRENTE ELETTRICA
- Esempio 17.5 Caratteristiche elettriche della lampadina a incandescenza*
- 17.12 CARICA E SCARICA DI UN CONDENSATORE
- Esempio 17.6 Pacemaker o stimolatore cardiaco*
- Riepilogo delle grandezze fisiche e unità di misura*

APPROFONDIMENTI

NOTA E17.1 ENERGIA POTENZIALE DEL CAMPO DI FORZA ELETROSTATICO

E17.1 IL TEOREMA DI GAUSS E LE SUE CONSEGUENZE

Esempio E17.1 Il campo elettrico di una sfera isolante

E17.2 LA MOBILITÀ ELETTRONICA E

L'ELETTROLISI

Esempio E17.2 Circuito in corrente continua

Esempio E17.3 Circuito in corrente continua

Capitolo 18

Fenomeni elettrici nei sistemi biologici

18.1	INTRODUZIONE	343
18.2	FLUSSI ELETTROCHEMICI	344
18.3	POTENZIALI ED EQUILIBRI ELETTROCHEMICI	345
18.4	EQUILIBRIO DI DONNAN-GIBBS	346
18.5	LA PRESSIONE ONCOTICA	347
18.6	LA MEMBRANA CAPILLARE	349
18.7	LA MEMBRANA CELLULARE: POTENZIALE DI RIPOSO E MECCANISMI DI TRASPORTO PASSIVO	350
<i>Esempio 18.1 Equilibri di membrana</i>		353
18.8	FLUSSI IONICI IN ASSENZA DI EQUILIBRIO E MECCANISMI DI TRASPORTO ATTIVO (POMPA SODIO-POTASSIO)	354
18.9	LAVORO DI MEMBRANA	356
<i>Esempio 18.2 Bilanci energetici cellulari</i>		357
<i>Riepilogo delle grandezze fisiche e unità di misura</i>		358
 APPROFONDIMENTI		
NOTA E18.1 DEDUZIONE DELL'EQUAZIONE DI NERNST PARTENDO DALL'EQUILIBRIO DEI FLUSSI IONICI		
<i>Esempio E18.1 Caratteristiche elettriche della membrana cellulare</i>		
NOTA E18.2 DEDUZIONE DELL'EQUAZIONE DI GOLDMAN		
<i>Esempio E18.2 Rapporto P_{Na}/P_K in cellule eccitabili</i>		
<i>Esempio E18.3 Rapporto P_{Na}/P_K in cellule non eccitabili (eritrociti)</i>		

Capitolo 19

Fenomeni bioelettrici: il potenziale d'azione, propagazione e conseguenze

19.1	INTRODUZIONE	359
19.2	LE ATTIVITÀ BIOELETTRICHE NEI SISTEMI BIOLOGICI	359
19.3	IL POTENZIALE D'AZIONE	360
19.4	IL CASO DELLE MEMBRANE NON ECCITABILI	363
<i>Esempio 19.1 Tempi di attraversamento della membrana da parte di ioni Na^+</i>		363

19.5 PROPRIETÀ DI CAVO DELL'ASSONE	364	<i>Esempio 19.2 Resistenza interna dell'assone</i>	367	<i>Esempio 20.3 Circuito RLC</i>	392
19.6 PROPAGAZIONE DEL POTENZIALE D'AZIONE	367			<i>Esempio 20.4 Applicazione del trasformatore: il defibrillatore cardiaco</i>	392
19.7 IL CASO DELLE FIBRE MIELINICHE	370			20.11 POTENZA DISSIPATA IN UN CIRCUITO IN CORRENTE ALTERNATA	394
<i>Esempio 19.3 Velocità di propagazione dei potenziali d'azione</i>	372			20.12 LE ONDE ELETTROMAGNETICHE	395
19.8 TRACCIATI ECG, EEG ED EMG	372			20.13 CIRCUITI OSCILLANTI	397
<i>Esempio 19.4 Applicabilità dell'approssimazione dipolare per ECG</i>	375			20.14 EMISSIONE E ASSORBIMENTO DELLE ONDE ELETTROMAGNETICHE	398
<i>Riepilogo delle grandezze fisiche e unità di misura</i>	375			<i>Riepilogo delle grandezze fisiche e unità di misura</i>	400

APPROFONDIMENTI

NOTA E19.1 POTENZIALE ELETTRICO LUNGO UNA LINEA DISTRIBUITA (CAVO COASSIALE)

E19.1 L'ELETTRICITÀ NEI PESCI

Esempio E19.1 Correnti elettriche erogate da anguille

E19.2 CONCLUSIONE DEL CAPITOLO 19

Capitolo 20

Elettromagnetismo

20.1 INTRODUZIONE	377	<i>Esempio 20.1 Intensità del campo di forza magnetico</i>	380	21.1 INTRODUZIONE	401
20.2 IL CAMPO MAGNETICO	377			21.2 LE ONDE ELETTROMAGNETICHE VISIBILI: LA LUCE	401
<i>Esempio 20.2 Campo magnetico di una bobina</i>	383			<i>Esempio 21.1 Energia luminosa da una lampadina a incandescenza</i>	403
20.3 LA FORZA DI LORENTZ E IL MOTO DI UNA PARTICELLA CARICA IN UN CAMPO MAGNETICO UNIFORME	380			21.3 LA DIFFRAZIONE DELLA LUCE	404
20.4 MOMENTI MAGNETICI E PROPRIETÀ MAGNETICHE DELLA MATERIA	381			21.4 IL PRISMA E LA DISPERSIONE DELLA LUCE	406
<i>Esempio 20.3 Momento magnetico di un filo</i>	383			<i>Esempio 21.2 Rifrazione nel vetro</i>	409
20.5 TEOREMA DELLA CIRCUITAZIONE E NON CONSERVATIVITÀ DEL CAMPO MAGNETICO	384			<i>Esempio 21.3 Angolo limite</i>	409
20.6 FLUSSO DI CAMPO MAGNETICO E INDUZIONE ELETTROMAGNETICA	384			21.5 LA POLARIZZAZIONE DELLA LUCE	409
20.7 LE EQUAZIONI FONDAMENTALI DELL'ELETTROMAGNETISMO	385			21.6 IL DIOTTRO	410
20.8 IL FENOMENO DELL'AUTOINDUZIONE	386			21.7 LE LENTI SOTTILI	414
20.9 CIRCUITI IN CORRENTE ALTERNATA	388			<i>Esempio 21.4 Lente sottile in aria e in acqua</i>	416
20.10 IMPEDENZA ELETTRICA E RISONANZA. IL TRASFORMATORE	389			<i>Esempio 21.5 Potere diottico della cornea</i>	416
				21.7a Costruzione dell'immagine da una lente sottile	417
				21.7b Ingrandimento lineare	417
				<i>Esempio 21.6 Immagine di due lenti convergenti separate</i>	419
				<i>Riepilogo delle grandezze fisiche e unità di misura</i>	420



APPROFONDIMENTI

E20.1 TEOREMA DELLA CIRCUITAZIONE E NON CONSERVATIVITÀ DEL CAMPO MAGNETICO

E20.2 LE EQUAZIONI FONDAMENTALI DELL'ELETTROMAGNETISMO

E20.3 IL BISTURI ELETTRICO

E20.4 LE ONDE ELETTROMAGNETICHE

Capitolo 21

Ottica fisica e Ottica geometrica

21.1 INTRODUZIONE	401
21.2 LE ONDE ELETTROMAGNETICHE VISIBILI: LA LUCE	401
<i>Esempio 21.1 Energia luminosa da una lampadina a incandescenza</i>	403
21.3 LA DIFFRAZIONE DELLA LUCE	404
21.4 IL PRISMA E LA DISPERSIONE DELLA LUCE	406
<i>Esempio 21.2 Rifrazione nel vetro</i>	409
<i>Esempio 21.3 Angolo limite</i>	409
21.5 LA POLARIZZAZIONE DELLA LUCE	409
21.6 IL DIOTTRO	410
21.7 LE LENTI SOTTILI	414
<i>Esempio 21.4 Lente sottile in aria e in acqua</i>	416
<i>Esempio 21.5 Potere diottico della cornea</i>	416
21.7a Costruzione dell'immagine da una lente sottile	417
21.7b Ingrandimento lineare	417
<i>Esempio 21.6 Immagine di due lenti convergenti separate</i>	419
<i>Riepilogo delle grandezze fisiche e unità di misura</i>	420


APPROFONDIMENTI
E21.1 LA POLARIZZAZIONE DELLA LUCE

E21.1a La polarizzazione per emissione e assorbimento selettivo: il polaroid

E21.1b La polarizzazione per riflessione

Esempio E21.1 Polarizzazione per riflessione

E21.1c La polarizzazione per doppia rifrazione: il prisma di Nicol

E21.2 LA LUCE COERENTE
E21.3 DIFETTI DELLE LENTI: ABERRAZIONI
E21.4 LE SUPERFICI SPECULARI

Esempio E21.2 Immagine di uno specchio piano

Nota E21.1 INVERSIONE DESTRA-SINISTRA


Capitolo 22
La strumentazione ottica in Biologia e in Medicina
22.1 INTRODUZIONE

421

22.1 LA LUCE POLARIZZATA E IL POTERE ROTATORIO

421

Esempio 22.1 Misura della concentrazione con il polarimetro

423

22.3 ASSORBIMENTO OTTICO E SPETTROFOTOMETRIA

423

22.4 IL MICROSCOPIO

426

22.4a Il microscopio semplice
22.4b Il microscopio composto

427

Esempio 22.2 Lente di ingrandimento

427

Riepilogo delle grandezze fisiche e unità di misura

430


APPROFONDIMENTI
E22.1 IL POTERE SEPARATORE DEL MICROSCOPIO
E22.2 LA PROFONDITÀ DI CAMPO DEL MICROSCOPIO

Esempio E22.1 Caratteristiche dell'immagine di un microscopio: distanza oggetto, ingrandimento, risoluzione, profondità di campo

E22.3 MICROSCOPI OTTICI SPECIALI

E22.3a Microscopio a contrasto di fase

E22.3b Microscopio polarizzatore

E22.3c Microscopio a fluorescenza

E22.3d Microscopia digitale

E22.4 LE FIBRE OTTICHE E LA LORO UTILIZZAZIONE IN DIAGNOSTICA MEDICA
E22.5 LA DIFFRAZIONE DEI RAGGI X E LA STRUTTURA DELLE MOLECOLE BIOLOGICHE

Esempio E22.2 Raggi X monocromatici


Capitolo 23
La funzione visiva
23.1 INTRODUZIONE

433

23.2 L'OCCHIO E IL SUO POTERE SEPARATORE

433

23.2a Descrizione anatomica

433

23.2b L'occhio come sistema ottico

434

23.2c Acuità visiva

435

Esempio 23.1 Distanza limite da acuità visiva

437

23.3 I DIFETTI OTTICI DELL'OCCHIO

438

Esempio 23.2 Difetto da punto prossimo

439

Esempio 23.3 Difetto da punto remoto

439

23.4 IL MECCANISMO DELLA VISIONE

439

Esempio 23.4 Massima distanza di visibilità

441


APPROFONDIMENTI
E23.1 IL MECCANISMO DELLA VISIONE E LA PERCEZIONE DEI COLORI

E23.1a La retina

E23.1b I fotorecettori e le cellule elaboratrici

E23.1c Il meccanismo della visione

Esempio E23.1 Minima risposta visiva

Esempio E23.2 Massima distanza di visibilità

E23.1d La connessione bulbi oculari-cervello

E23.1e Il triangolo del colore e la visione cromatica

Esempio E23.3 Il triangolo del colore

E23.2 LA PERCEZIONE VISIVA NEGLI ANIMALI

Capitolo 24
Materia e radiazioni
24.1 INTRODUZIONE

443

24.2 ATOMI E MOLECOLE

443

24.3 LA RADIAZIONE ELETTRONAGNETICA

445

24.4 I NUCLEI E LE FORZE NUCLEARI	446	25.7 I RAGGI ULTRAVIOLETTI	463
<i>Esempio 24.1 Energia da difetto di massa</i>	449	25.7a Effetti biologici dei raggi ultravioletti	464
24.5 LA RADIOATTIVITÀ	449	<i>Esempio 25.3 Emissione di UVA</i>	465
24.6 LA LEGGE DEL DECADIMENTO RADIOATTIVO	451	25.8 I RAGGI X E LA LORO PRODUZIONE	466
<i>Esempio 24.2 Decadimento radioattivo del cobalto-60</i>	453	25.8a Il tubo a raggi X	466
<i>Esempio 24.3 Datazione mediante carbonio-14</i>	453	25.8b Produzione e spettro dei raggi X	467
24.7 ASSORBIMENTO DELLE RADIAZIONI NELLA MATERIA	454	<i>Esempio 25.4 Produzione di raggi X</i>	470
<i>Riepilogo delle grandezze fisiche e unità di misura</i>	454	25.9 I RAGGI X IN DIAGNOSTICA MEDICA	471
 APPROFONDIMENTI		25.9a Assorbimento dei raggi X	471
E24.1 GLI ATOMI		<i>Esempio 25.5 Assorbimento dei raggi X in diversi materiali</i>	476
E24.2 LA MECCANICA ONDULATORIA		25.9b L'immagine radiologica	477
<i>Esempio E24.1 Indeterminazione della posizione</i>		25.9c L'intensificatore d'immagine o amplificatore di brillanza	480
<i>Esempio E24.2 Dualismo onda-corpuscolo</i>		25.10 LA RADIAZIONE GAMMA	481
E24.3 LA STRUTTURA ATOMICA		<i>Riepilogo delle grandezze fisiche e unità di misura</i>	481
<i>Esempio E24.3 Assorbimento di fotoni</i>			
E24.4 LA STRUTTURA MOLECOLARE E GLI STATI DELLA MATERIA			
E24.5 SPETTROMETRIA DI MASSA			
<i>Esempio E24.4 Impiego di uno spettrometro di massa</i>			
E24.5 ACCELERATORI DI PARTICELLE IN MEDICINA			
E24.6a Il ciclotrone			
E24.6b Il betatrone			
E24.6c Il sincrotrone			
E24.6d Acceleratori lineari			

■ Capitolo 25

Le radiazioni elettromagnetiche in Biologia e in Medicina

25.1 INTRODUZIONE	455	26.1 INTRODUZIONE: LA IONIZZAZIONE	483
25.2 LA RADIAZIONE ELETTRONICA E L'EMISSIONE TERMICA	455	26.2 ASSORBIMENTO DELLA RADIAZIONE IONIZZANTE NELLA MATERIA (CORPUSCOLARE, X E GAMMA)	483
<i>Esempio 25.1 Variazione di temperatura per emissione termica</i>	457	26.2a Dosimetria	484
25.3 CAMPI ELETTRONICI A BASSA FREQUENZA E A RADIOFREQUENZA	457	<i>Esempio 26.1 Valutazione di RBE</i>	487
25.4 LE MICROONDE IN MEDICINA	458	26.2b Assorbimento dei fotoni gamma	488
25.5 LA RADIAZIONE INFRAROSSA	459	<i>Esempio 26.2 Attività di una sorgente di cobalto-60</i>	489
25.6 LA RADIAZIONE VISIBILE. DISPOSITIVI LASER IN MEDICINA	460	26.2c Assorbimento della radiazione corpuscolare	489
<i>Esempio 25.2 Confronto tra luce solare e luce laser</i>	463	26.2d Confronto fra diverse radiazioni	489
		26.3 EFFETTI BIOLOGICI DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI	491
		26.3a Radiobiologia cellulare	493
		26.3b Effetti biologici macroscopici della radiazione ionizzante	495
		<i>Esempio 26.3 Avvelenamento da polonio radioattivo (il caso Litvinenko)</i>	496
		<i>Esempio 26.4 Effetto termico della radiazione ionizzante</i>	497
		<i>Esempio 26.5 Effetto termico di radiazione mortale</i>	497
		26.3c Sterilizzazione mediante radiazioni ionizzanti	497
		<i>Riepilogo delle grandezze fisiche e unità di misura</i>	497


APPROFONDIMENTI
E26.1 DISPOSITIVI DI RIVELAZIONE
Capitolo 27
Radiodiagnostica, radioterapia e radioprotezione

27.1	INTRODUZIONE	499
27.2	RADIAZIONI IONIZZANTI IN RADIODIAGNOSTICA	499
27.2a	Radiodiagnostica da irraggiamento X	499
27.2b	Radiodiagnostica con l'impiego di radionuclidi	501
<i>Esempio 27.1 Periodo di dimezzamento effettivo</i>		503
<i>Esempio 27.2 Caratteristiche di impiego dello iodio 131</i>		503
<i>Esempio 27.3 Misura del volume di sangue con iodio 131</i>		504
27.3	RADIAZIONI IONIZZANTI IN RADIOTERAPIA	504
27.3a	Premessa	504
<i>Esempio 24.4 Rapporto terapeutico</i>		506
27.3b	Radioterapia convenzionale	506
27.3c	Radioterapia con protoni, neutroni e ioni (adroterapia)	509
27.4	LA RADIAZIONE IONIZZANTE NELL'AMBIENTE	512
27.4a	La radiazione naturale	512
27.4b	La radiazione naturale da attività umana (antropica)	514
27.5	CENNI DI RADIOPROTEZIONE	514
27.5a	Pericolosità delle radiazioni ionizzanti	515
27.5b	Principi fondamentali di radioprotezione	516
27.5c	Misure di tutela	517
<i>Esempio 27.5 Radioprotezione da cobalto-60</i>		519
<i>Riepilogo delle grandezze fisiche e unità di misura</i>		520


APPROFONDIMENTI
E27.1 ALTRI ASPETTI DI RADIOPROTEZIONE
Capitolo 28
Strumentazione biomedica

28.1 INTRODUZIONE

28.2	LA SICUREZZA NEGLI IMPIANTI ELETTRICI	521
28.2a	Le correnti elettriche nel corpo umano	521
28.2b	Lo shock elettrico	522
28.2c	Sistemi di protezione	526
<i>Esempio 28.2.1 Effetti da elettrocuzione</i>		528
28.3	I TRASDUTTORI	528
28.3a	Elettrodi e microelettrodi	529
28.3b	Trasduttori di grandezze meccaniche	532
<i>Esempio 28.3.1 Flussimetria</i>		534
28.3c	Pletismografia a impedenza: bioimpedenza elettrica toracica	534
<i>Esempio 28.3.2 Impedenza toracica e gittata sistolica</i>		539
28.3d	Trasduttori di temperatura	540
28.3e	Trasduttori ottici	540
28.3f	Trasduttori chimici	542
28.4	IL MICROSCOPIO ELETTRONICO	543
28.4a	Le lenti elettrostatiche	543
28.4b	La microscopia elettronica	545
<i>Esempio 28.4.1 Microscopio elettronico: risoluzione</i>		549
28.5	L'ELETTROCARDIOGRAFIA	549
28.5a	Il modello dipolare	549
28.5b	Il momento di dipolo elettrico cardiaco	551
28.5c	Le derivazioni elettrocardiografiche	551
28.5d	Aspetti tecnici	556
<i>Esempio 28.5.1 Asimmetria nella posizione del cuore</i>		558
28.6	ECOGRAFIA ED ECOCARDIOGRAFIA	559
28.6a	Caratteristiche ed effetti delle vibrazioni ultrasonore	559
28.6b	Caratteristiche tecniche dell'ecografia	560
28.6c	Elaborazione elettronica dei segnali	566
28.6d	Modi di analisi ecografiche ed ecocardiografia dinamica	568
<i>Esempio 28.6.1 Ecografia cerebrale</i>		570
28.7	LA FRANTUMAZIONE MECCANICA DI CALCOLI	571
28.7a	Il litotritore: principi fisici e aspetti tecnici	571
<i>Esempio 28.7.1 Forza agente su calcolo renale</i>		576
28.8	IL RENE ARTIFICIALE	576
28.8a	Evoluzione temporale della diffusione	576
28.8b	Descrizione del rene artificiale	579
28.8c	Tempi di emodialisi	581
<i>Esempio 28.8.1 Concentrazione in seguito a emodialisi</i>		582
28.9	IMMAGINI TOMOGRAFICHE: TC, SPECT, PET, RM, ECO E OTC	582
28.9a	La ricostruzione di immagini tomografiche	583
<i>Esempio 28.9.1 Proiezioni tomografiche</i>		586

28.9b	Tomografia computerizzata (TC)	587	A.3 Descrizione di una distribuzione statistica mediante la media e la varianza	A-2
28.9c	Tomografia a emissione di fotone singolo (SPECT)	593	A.4 Curva di distribuzione normale o di Gauss	A-4
28.9d	Tomografia a emissione di positroni (PET)	596	A.5 Analisi grafica di risultati sperimentali	A-5
28.9e	Immagini da risonanza magnetica nucleare (RM)	600	<i>Esempio A.1 Propagazione degli errori</i>	A-7
28.9f	Immagini ecotomografiche	608		
28.9g	Tomografia ottica coerente (<i>Optical Coherence Tomography</i> , OCT)	609		
<i>Esempio 28.9.2 Energia assorbita nella RM</i>		612		
28.10	CHIRURGIA ROBOTICA	612	APPENDICE B	
28.10a	La Fisica alla base dei sistemi robotici	613	Cenni di informatica	
28.10b	Il sistema robotico	614	B.1 Introduzione	B-1
28.10c	Le applicazioni cliniche	617	B.2 Unità di misura caratteristiche dei mezzi di calcolo	B-1
28.10d	Limiti e possibili sviluppi del sistema	618	B.3 La conversione analogico-digitale	B-3
<i>Esempio 28.10.1 Emissione da fluorescenza</i>		618	B.4 Reti di calcolo e conclusioni	B-5
28.11	MACCHINA CUORE-POLMONE (CIRCOLAZIONE EXTRACORPOREA)	619	<i>Esempio B.1 Analisi armonica di tracciati EEG</i>	B-6
28.11a	Cenni storici, generalità e scopo della macchina cuore-polmone	619		
28.11b	Cannule per drenaggio venoso e per immissione arteriosa	619	APPENDICE C	
28.11c	Sistema di pompe	620	Dati numerici e tabelle	
28.11d	Riserva venosa (<i>reservoir</i>) e ossigenatore	622	C.1 Costanti fondamentali della Fisica	C-2
28.11e	Scambiatore di calore	624	C.2 Alfabeto greco	C-2
28.11f	Filtri e dispositivi accessori	624	C.3 Prefissi per potenze di 10	C-3
28.11g	Aspetti medico-clinici	624	C.4 Dimensioni, tempi e masse	C-3
28.12	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	625	C.5 Simboli, dimensioni e unità di misura delle principali grandezze fisiche	C-4
<i>Problemi</i>		629	C.6 Tavola periodica degli elementi (Tavola di Mendeleev)	C-6
APPENDICI		C-1	C.7 Elenco delle tabelle nel testo	C-8
APPENDICE A				
Cenni di teoria della misura e di statistica				
A.1 Cenni di metodologia della misura e di teoria dell'errore		A-1	APPENDICE D	
A.2 Curva di distribuzione delle frequenze		A-1	Risposte ai problemi	D-1
			Indice analitico	I-1

viene determinato da un **gradiente (variazione) efficace** di pressione parziale che si ottiene mediando la variazione di pressione parziale lungo il percorso capillare. Assumendo tale percorso di circa 200 μm si ottiene un valore medio:

$$\overline{\Delta p_{O_2}} = \frac{1}{\ell} \sum_i (\Delta p_{O_2})_i \Delta X_i = \frac{1}{\ell} \int_0^\ell \Delta p_{O_2} dx \approx 15 \text{ mmHg} \quad (15.40)$$

Per eseguire il calcolo del flusso di O_2 attraverso la membrana capillare si deve assumere questo dato medio (valore efficace di gradiente di $p_{O_2} = 15 \text{ mmHg}$).

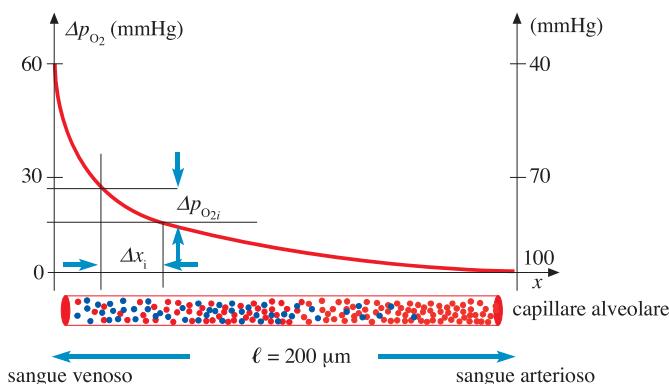


Figura 15.22

Andamento della variazione di pressione parziale di ossigeno lungo il percorso del capillare intorno all'alveolo

Tabella 15.9 Composizione dell'aria inspirata secca e dell'aria alveolare

GAS	ARIA INSPIRATA		ARIA ALVEOLARE	
	composizione%	pressione parziale	composizione%	pressione parziale
N ₂	79.04%	600.7 mmHg	80.4%	573.2 mmHg
O ₂	20.92%	159.0 mmHg	9.0%	99.8 mmHg
CO ₂	0.04%	0.3 mmHg	5.6%	40.0 mmHg
H ₂ O	0	0	—	47.00 mmHg
	<u>100%</u>	<u>760.0 mmHg</u>		<u>760.00 mmHg</u>

Sulla base dei dati della Tabella 15.9 possiamo valutare l'efficacia della semplice diffusione, per esempio nell'ossigenazione del sangue venoso, ricorrendo alla legge di Henry (15.37). Il volume di ossigeno che si scioglie in 100 ml di sangue venoso, essendo nell'alveolo $p_{O_2} = 99.8$ mmHg e supponendo il sangue costituito in pratica da acqua, risulta essere:

$$V_{O_2} = s \cdot p_{O_2} = 2.3 \cdot \frac{99.8}{760} = 0.3 \text{ ml}, \quad (15.41)$$

per ogni 100 ml di sangue, dove $s = 2.3 \text{ cm}^3/\text{atm}$ è il coefficiente di solubilità dell' O_2 in acqua (Tabella 15.7) riferito ad 1 atmosfera e p_{O_2} è la pressione parziale di ossigeno espressa in atmosfere. In un litro di sangue si scioglie dunque, per la legge di Henry, un volume di 3 cm^3 di ossigeno. Confrontiamo questo valore con le necessità dell'organismo. La minima quantità di energia necessaria a mantenere le sole funzioni vitali dell'organismo, chiamata metabolismo basale, per un soggetto normale adulto è di circa $50 \text{ kcal ora}^{-1}\text{m}^{-2}$. La superficie corporea media per lo stesso soggetto è di circa 2 m^2 , mentre il calore di combustione sviluppato da un

Diffusione dell'ossigeno

litro di O_2 (in condizioni NTP) nei processi metabolici è in media di circa 4.825 kcal (§11.5). Per ottenere 50 kcal $ora^{-1}m^{-2}$, il soggetto deve utilizzare:

$$50 \frac{\text{kcal}}{\text{ora } m^2} \cdot 2 \text{ m}^2 \cdot \frac{1}{4.825 \text{ kcal / litro } O_2} = 21 \frac{\text{litri } O_2}{\text{ora}}. \quad (15.42)$$

Passando da NTP a 37°C , essendo la pressione costante di 1 atm, si ottiene $V = V_o T(K) / 273 \text{ K} = 21 \cdot 310 / 273 = 24 \text{ litri } O_2/\text{ora}$. Questa è la minima quantità di ossigeno che deve pervenire ai tessuti. Poiché la quantità di sangue arterioso immessa in circolo in ogni contrazione del ventricolo sinistro è di circa 60 cm^3 e la frequenza cardiaca è circa un ciclo al secondo, in un'ora il sangue ossigenato introdotto in circolo sarà:

$$60 \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1} \cdot 3600 \text{ s} = 216000 \text{ cm}^3 \text{ ora}^{-1} = 216 \text{ litri/ora}. \quad (15.43)$$

Il contenuto in O_2 di questo sangue, per la (15.41), risulta pertanto essere di: $216 \text{ litri/ora} \cdot 3 \text{ cm}^3/\text{litro} = 0.65 \text{ litri/ora}$, che, confrontato con i 24 litri/ora richiesti, risulta essere del tutto inadeguato: il semplice processo fisico della diffusione è insufficiente a sopportare alle minime necessità vitali dell'organismo umano. Per raggiungere questo scopo la maggior parte delle molecole di O_2 si combina, infatti, con le molecole di emoglobina contenute nei globuli rossi, che ne consentono il trasporto e il rilascio ai tessuti in grandi quantità: si tratta quindi di un meccanismo di "aggancio" e trasporto di tipo biochimico, la cui trattazione dettagliata esula dagli scopi di questo testo (Esempio 15.4).

ESEMPIO 15.4 Ossigeno trasportato dall'emoglobina

Calcolare il volume di ossigeno trasportato dall'emoglobina in un'ora, considerando che 1 g di emoglobina trattiene, quando completamente saturato, un massimo di 1.34 ml di ossigeno e che normalmente il sangue contiene circa 15 g di emoglobina ogni 100 ml = 0.1 litri.

Soluzione La quantità di ossigeno trasportata sarà quindi di circa $1.34 \cdot 15 = 20 \text{ ml}$ di O_2 per 100 ml di sangue, cioè 20

volumi per cento. Come visto nel §15.7, giungono ai tessuti circa 216 litri di sangue ossigenato ogni ora. Il contenuto in ossigeno, legato alla molecola di emoglobina (che trattiene un massimo di 4 molecole di ossigeno), risulta essere: $216 \text{ litri/ora} \cdot 200 \text{ ml/litro} = 43000 \text{ ml/ora} = 43 \text{ litri/ora}$, da confrontare con il minimo necessario (ricavato dal metabolismo basale medio, §15.7) di 24 litri/ora. Come si vede l'approssimazione ai tessuti è più che sufficiente.

ESEMPIO 15.5 Tempi di diffusione attraverso la membrana alveolare

Le molecole di ossigeno che diffondono attraversando l'aria alveolare e le membrane alveolare e capillare devono impiegare un intervallo di tempo assai più breve del tempo di percorrenza dei globuli rossi nei capillari che avvolgono gli alveoli, altrimenti l'emoglobina non riesce a catturare l'ossigeno. Si tratta di effettuare una verifica.

Cominciamo a calcolare l'intervallo di tempo t_1 impiegato dalla molecola a passare dal centro dell'alveolo alla membrana alveolare e l'intervallo di tempo t_2 per attraversare le membrane alveolare e capillare. Il tempo t_1 si ottiene elabo-

rando la teoria cinetica dei gas, assumendo gli alveoli sferici con raggio di 10^{-2} cm e le membrane attraversate fatte di acqua con spessore di $5 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$:

$$t_1 = \frac{s^2}{6D_{\text{aria}}} \approx \frac{r^2}{6D_{\text{aria}}} = \frac{(10^{-2})^2 \text{ cm}^2}{6 \cdot 0.178 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}} \approx 10^{-4} \text{ s},$$

$$t_2 = \frac{s^2}{6D_{H_2O}} \approx \frac{d^2}{6D_{H_2O}} = \frac{(5 \cdot 10^{-4})^2 \text{ cm}^2}{6 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}} \approx 4 \cdot 10^{-3} \text{ s},$$

ESEMPIO 15.5 *continua*

dove s^2 è la distanza media percorsa, D_{aria} e $D_{\text{H}_2\text{O}}$ i coefficienti di diffusione in aria e in acqua rispettivamente.

In totale abbiamo circa $t_1 + t_2 = 4 \cdot 10^{-3}$ secondi = 4 millisecondi. Questo intervallo di tempo va confrontato con il tempo t_3 di permanenza dell'eritrocita vicino all'alveolo (percorso del capillare = 200 μm e velocità del sangue nel capillare alveolare di 1 mm s^{-1}):

$$t_3 = \frac{\ell}{v_{\text{sangue}}} \simeq \frac{2 \cdot 10^{-2} \text{ cm}}{10^{-1} \text{ cm s}^{-1}} \simeq 0.2 \text{ s} = 200 \text{ ms.}$$

Come si vede $t_3 \gg 4$ millisecondi e le molecole di emoglobina negli eritrociti hanno ampiamente il tempo di saturarsi di ossigeno.

Nel caso della CO_2 , essendo il suo coefficiente di diffusione in acqua 20 volte quello dell'ossigeno, ne risulta un intervallo di tempo t_2 20 volte inferiore, dell'ordine circa di 0.2 millisecondi che sommato ad un intervallo t_1 (nell'aria alveolare) simile a quello dell'ossigeno fornisce un tempo totale di 0.3 millisecondi per passare dal sangue all'aria alveolare. Ne segue che elevate quantità di CO_2 possono diffondere dal sangue venoso all'interno dell'alveolo durante il tragitto del sangue intorno all'alveolo.

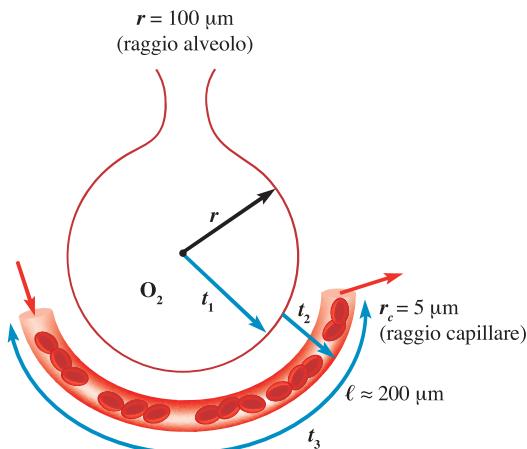


Figura 15.23

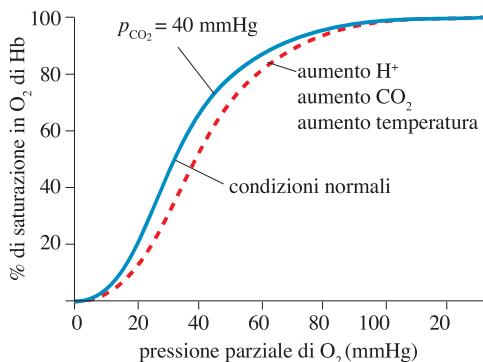
Rappresentazione schematica della diffusione dei gas alveolari e del moto degli eritrociti nei capillari alveolari.

Per quanto riguarda il trasporto della CO_2 prodotta nei tessuti intervengono anche in questo caso aspetti connessi con la biochimica che esulano dalla trattazione del presente volume. Tuttavia è opportuno richiamare l'attenzione sull'effetto dissociativo di questo gas sull'emoglobina satura di ossigeno, brevemente riportato nel seguito.

b) Curva di dissociazione dell'emoglobina. A questo punto ci si pone la domanda in che modo le molecole di ossigeno legate all'emoglobina possono staccarsi e diffondere verso i tessuti? È necessario considerare l'ambiente in cui si trovano gli eritrociti (pieni di molecole di emoglobina) nei capillari in prossimità dei tessuti: tale ambiente ha la particolarità di avere una elevata concentrazione di molecole CO_2 provenienti dai processi di ossidazione (combustione) che si verificano con continuità nelle cellule dei tessuti (producendo energia). Infatti la saturazione in ossigeno dell'emoglobina viene a dipendere dalla quantità di CO_2 nell'ambiente (pressione parziale di CO_2 : p_{CO_2}), oltre che dal pH e dalla temperatura. Ad elevate p_{CO_2} (e pH relativamente basso) l'affinità dell'emoglobina per l'ossigeno diminuisce favorendo il rilascio di ossigeno nei tessuti. In pratica maggiore è la p_{CO_2} , maggiore sarà la p_{O_2} necessaria affinché l'emoglobina venga saturata ossia, maggiore sarà la quantità di CO_2 presente nel sangue, meno O_2 resterà legato all'emoglobina, come mostrato nella Figura 15.24. In altri termini dove la p_{O_2} è bassa l'emoglo-

Figura 15.24

Linea azzurra: curva di dissociazione dell'emoglobina in condizioni normali (fisiologiche) per una $p_{\text{CO}_2} = 40 \text{ mmHg}$. Il volume % di Hb satura è una funzione sia di p_{O_2} sia di p_{CO_2} : $V\% = f(p_{\text{O}_2}, p_{\text{CO}_2})$, per cui al crescere della p_{CO_2} la curva tende a spostarsi a destra (linea tratteggiata rossa).



bina cede volentieri l'ossigeno (distretti periferici) mentre dove p_{O_2} aumenta l'emoglobina riesce a legarsi con facilità (distretto polmonare). È opportuno osservare che l'andamento a S della curva di Figura 15.24 mostra che tra 20 e 60 mmHg di p_{O_2} , piccoli incrementi di p_{O_2} comportano rilevanti aumenti nella saturazione di ossigeno, come è opportuno che avvenga.

La curva a S della Figura 15.24 si modifica spostandosi a destra (linea tratteggiata) quando un tessuto (periferico) consuma maggior quantità di ossigeno con conseguente aumento della pressione di CO_2 (prodotta nei processi di combustione nei tessuti): in questo caso la curva di dissociazione dell'emoglobina evidenzia una riduzione della sua affinità per l'ossigeno e maggior rilascio di O_2 (come necessario che avvenga). Lo stesso effetto si ottiene con un aumento di temperatura o con una diminuzione del pH. Lo spostamento della curva verso destra è chiamato 'effetto Bohr' (1904).

c) Diffusione dell'azoto e dei gas anestetici. Per quanto concerne l'azoto, che non partecipa a processi biologici importanti, esso diffonde nel corpo umano in quantità previste dalla legge di Henry. A 37°C il coefficiente di solubilità dell'azoto in acqua è $s = 1.2 \text{ cm}^3/\text{atm}$ e la quantità di azoto disciolto nei tessuti risulta essere non trascurabile:

$$V_{\text{N}_2} = s \cdot p_{\text{N}_2} = 1.2 \cdot \frac{573}{760} = 1 \text{ cm}^3 \text{ per ogni 100 ml di acqua,} \quad (15.44)$$

che, per un individuo di 80 kg, essendo un soggetto adulto composto per il 67% di acqua, diventa:

$$80 \cdot 67 \text{ litri (H}_2\text{O)} \cdot \frac{10^{-3} \text{ litri (N}_2\text{)}}{10^{-1} \text{ litri (H}_2\text{O)}} = 0.55 \text{ litri} = 550 \text{ cm}^3. \quad (15.45)$$

Questo risultato vale per una pressione ambiente complessiva di una atmosfera. Se la pressione dell'aria inspirata supera l'atmosfera, come nel caso di un'immersione subacquea prolungata a causa della pressione idrostatica, la quantità di N_2 in soluzione nel plasma e nei tessuti aumenta secondo la legge di Henry. Se successivamente la pressione esterna torna bruscamente al valore normale di una atmosfera (emersione rapida), la quantità in eccesso di N_2 in soluzione si libera e, poiché il processo di eliminazione attraverso la diffusione alveolare è lento, si ha la formazione di bolle gassose nel sangue e nei tessuti con il rischio di embolia gassosa (§8.2b). Se la pressione parziale d'azoto supera le 4 atmosfere (corrispondente ad una immersione subacquea a 40-50 metri di profondità), la grande quantità di azoto disciolto nell'organismo (oltre 2 litri) provoca effetti anestetici (narcozi da azoto) dovuti all'azione esercitata sulle cellule nervose.

Anche i gas anestetici sono fisiologicamente neutri nel corso del processo di assorbimento e diffondono nell'organismo obbedendo alla legge di Henry. Il loro

Diffusione dell'azoto

coefficiente di solubilità è importante in quanto esso determina la rapidità dell'azione anestetica. Quanto più piccolo è il coefficiente di solubilità, tanto prima l'organismo si satura di gas e l'anestesia è rapida. Così, per esempio il ciclopropano è poco solubile in acqua ($s = 41.5 \text{ cm}^3/\text{atm}$ a 37°C) e causa perciò una rapida anestesia, mentre l'etere etilico è molto solubile in acqua ($s = 1520 \text{ cm}^3/\text{atm}$ a 37°C) per cui la saturazione dell'organismo viene raggiunta molto lentamente e quindi si produce un'anestesia lenta.

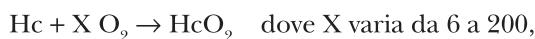
15.8 ESISTONO IN NATURA ALTERNATIVE ALL'EMOGLOBINA?

Come visto nel paragrafo precedente il trasporto di ossigeno in quantità ai tessuti è assicurato da una grossa molecola chiamata emoglobina, una molecola che fa parte dei pigmenti respiratori di metallo proteine. Questa molecola viene utilizzata dalla gran parte degli esseri viventi dotati di sistema circolatorio. Ci si può chiedere se esista in Natura una molecola simile con la stessa proprietà di cattura in grande quantità e in modo reversibile l'ossigeno.

La risposta è positiva: come l'emoglobina, che fa parte della classe dei pigmenti respiratori di metallo proteine, anche l'emocianina (molecola legata ad atomi di rame invece che di ferro) viene impiegata da sistemi biologici in ambienti particolari caratterizzati da basse temperature e scarsa concentrazione di ossigeno (Figura 15.25).

A titolo di confronto ricordiamo le caratteristiche dell'**emoglobina** (Hb) deputata al trasporto di ossigeno tramite la cattura reversibile $\text{Hb} + 4 \text{ O}_2 \rightarrow \text{HbO}_2$; possiede una massa atomica di circa 16800 dalton, le cui dimensioni sono circa $64 \text{ \AA} \times 55 \text{ \AA} \times 50 \text{ \AA}$, con un raggio efficacie di circa 60 \AA nella quale sono presenti 2 eme ferrosi e che possiede una affinità al CO purtroppo 200 volte maggiore dell'affinità con l'ossigeno (a una atmosfera). È opportuno osservare che le sue dimensioni sono tali che se fosse libera di circolare nel sangue causerebbe l'occlusione delle membrane renali e perciò le molecole di emoglobina sono racchiuse in un involucro (globulo rosso) (Figura 15.25).

L'**emocianina** (Hc) è una macromolecola costituita da sub-unità dotate di due atomi di rame (Cu) con un meccanismo di cattura reversibile simile a quello dell'emoglobina:



cioè può arrivare a ben 200 sub-unità, ciascuna con 2 atomi di rame che insieme legano una molecola di O_2 !

Dunque vi sono diverse emocianine che, in generale, vengono distinte in emocianine degli artropodi (granchi, astici, gamberi) e in emocianine dei molluschi (cefalopodi come polpi e calamari, e gasteropodi come le lumache di mare). Le prime sono costituite da 6-24 sub-unità da 75000 dalton fino ad un totale di $1.8 \cdot 10^6$ dalton e con raggi efficaci compresi tra 180 \AA e 270 \AA . Quelle dei molluschi sono costituite da 6-200 sub-unità da 50000 dalton fino ad un totale di 10^7 dalton e con raggi efficaci compresi tra 150 \AA e $450 \text{ \AA} = 0.045 \mu\text{m}$ (Figura 15.26).

A differenza dell'emoglobina queste macromolecole hanno dimensioni tali da non occludere le membrane renali e pertanto sono libere in circolazione nell'emolinfa animale in grande concentrazione (con conseguente elevata viscosità dell'emolinfa) e possiedono una scarsa affinità con il monossido di carbonio CO. Esse hanno colore bluastro quando saturate di ossigeno e sono trasparenti nella forma deoxygenata.

Ci possiamo chiedere il motivo per cui le emocianine non sono impiegate dai mammiferi, dato che sono molto più efficienti nel trasporto di O_2 e poco affini al mortale monossido di carbonio (si ricordi che l'affinità dell'emoglobina al CO è 200 volte quella all'ossigeno!). La ragione principale è determinata dalle loro elevate dimensioni e concentrazioni per cui il conseguente importante incremento nella viscosità del sangue comporta un sensibile aumento del lavoro car-

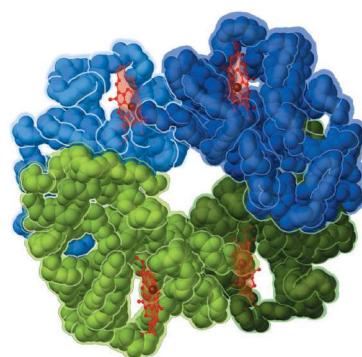
Gas anestetici

Caratteristiche fisico-chimiche dell'emoglobina

Caratteristiche fisico-chimiche delle emocianine

Figura 15.25

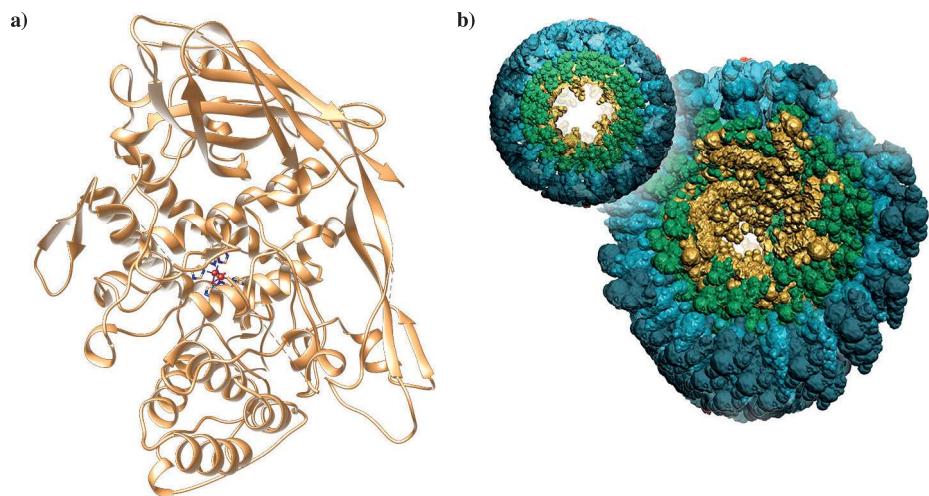
Struttura dell'emoglobina.



diaco (infatti artropodi e molluschi possiedono più pompe cardiache per questo motivo).

Figura 15.26

a) Struttura di una sub-unità di emocianina. **b)** Ricostruzione della struttura di una macromolecola di emocianina del mollusco (patella) a forma di barilotto di peso molecolare di circa 390 000 dalton, costituita da numerose sub-unità.



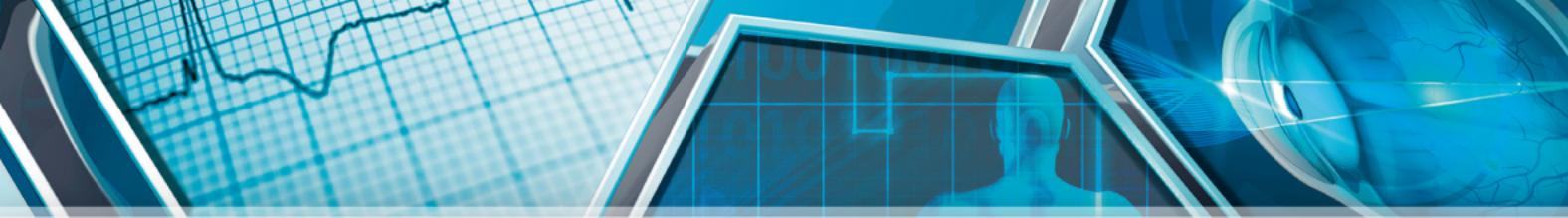
L'emocianina della *Megathura crenulata* (un tipo di patella) (Figura 15.26b) è impiegata ampiamente come proteina carrier nella produzione di anticorpi per applicazioni di ricerca, biotecnologie e terapeutiche.

RIEPILOGO DELLE GRANDEZZE FISICHE E UNITÀ DI MISURA

	Sistema Internazionale	Sistema C.G.S.	Sistema pratico
concentrazione C	kg/m^3	g/cm^3	moli/litro
flusso di soluto J_s	$\frac{\text{moli}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$	$\frac{\text{moli}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2}$	—
flusso di volume J_V	$\frac{\text{m}^3}{\text{s} \cdot \text{m}^2} = \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$\frac{\text{cm}^3}{\text{s} \cdot \text{cm}^2} = \frac{\text{cm}}{\text{s}}$	—
coefficiente di partizione α	<i>grandezza priva di dimensioni</i>		
coefficiente di diffusione D, D_M	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	$\frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$	—
libero cammino medio ℓ	m	cm	μm
permeabilità di membrana P	$\frac{\text{m}}{\text{s}}$	$\frac{\text{cm}}{\text{s}}$	—
coefficiente di hindrance ϵ	<i>grandezza priva di dimensioni</i>		
coefficiente di filtrazione L_p	$\frac{\text{m}}{\text{s Pa}}$	$\frac{\text{cm}}{\text{s baria}}$	$\frac{\text{cm}}{\text{s atm}}$
coefficiente di solubilità s	$\frac{\text{m}^3}{\text{Pa}}$	$\frac{\text{cm}^3}{\text{baria}}$	$\frac{\text{cm}^3}{\text{atm}}$

PROBLEMI

- 15.1** La velocità quadratica media delle molecole di un gas perfetto avente una massa molecolare di 32 unità di massa atomica è pari a 500 m s^{-1} . Calcolare l'energia cinetica media e la temperatura del gas.
- 15.2** Calcolare tramite la legge di Fick il numero di molecole di saccarosio ($\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$) avente coefficiente di diffusione di $5.2 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ a 20°C che in 10 s diffondono in acqua a 20°C lungo un tubo di sezione 6 cm^2 e con un gradiente di concentrazione di $0.25 \text{ kg m}^{-3}/\text{m}$.
- 15.3** Un sommozzatore di corporatura normale scende a 80 metri di profondità respirando aria (20% ossigeno e 80% azoto). Valutare il volume di aria che si scioglie nel suo corpo (a 37°C solubilità dell'azoto in acqua $s_{\text{N}_2} = 1.2 \text{ cm}^3/\text{atm}$ per 100 ml, solubilità dell'ossigeno in acqua $s_{\text{O}_2} = 2.3 \text{ cm}^3/\text{atm}$ per 100 ml).
- 15.4** Applicando la legge di Fick, calcolare il flusso di glicerina attraverso una membrana costituita da acqua dello spessore di $7.5 \cdot 10^{-9} \text{ metri}$ e area 10^{-2} cm^2 , quando la differenza di concentrazione ai due lati della membrana è $10^{-1} \mu\text{moli per litro}$. Il coefficiente di diffusione D della glicerina in acqua è $7.2 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$.
- 15.5** Calcolare il numero di molecole di O_2 introdotte nei polmoni in un respiro del volume di 500 cm^3 . Si assuma che l' O_2 nell'aria sia ridotto dal 20% al 16% quando misurato nella bocca.
- 15.6** Calcolare il volume di etere etilico che si scioglie nell'organismo di un soggetto di 90 kg (solubilità in acqua a 37°C $s = 1520 \text{ cm}^3/\text{atm}$ in 100 ml). Si assuma il contenuto in acqua del soggetto del 65%.



D. Scannicchio

Fisica Biomedica

Accedi all'**ebook** e ai **contenuti digitali** > **Espandi le tue risorse** > con un libro che **non pesa** e si **adatta** alle dimensioni del tuo **lettore**



All'interno del volume il **codice personale** e le istruzioni per accedere alla versione **ebook** del testo e agli ulteriori servizi. L'accesso alle risorse digitali è **gratuito** ma limitato a **18 mesi dalla attivazione del servizio**.