

Comprende

versione Ebook
e Software di simulazione

D. Scannicchio • E. Giroletti

Elementi di Fisica Biomedica

II Edizione


EdiSES
università



Accedi all'ebook ai contenuti digitali

Espandi le tue risorse

un libro che **non pesa**
e si **adatta** alle dimensioni
del **tuo lettore!**



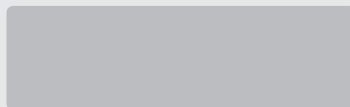
COLLEGATI AL SITO
EDISESUNIVERSITA.IT

ACCEDI AL
MATERIALE DIDATTICO

SEGUI LE
ISTRUZIONI

Utilizza il codice personale contenuto nel riquadro per registrarti al sito **edisesuniversita.it** e attiva 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 al materiale didattico** 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 autenticali 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**.

*A mia moglie che mi è sempre vicina
con amore*

Nico

*Ai miei studenti
che con la loro curiosità
mi hanno aiutato a migliorare*

Elio

ELEMENTI DI FISICA BIOMEDICA

II Edizione

Domenico Scannicchio • Elio Giroletti

Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Pavia



DOMENICO SCANNICCHIO - ELIO GIROLETTI
ELEMENTI DI FISICA BIOMEDICA - II Edizione
Copyright © 2023, 2015 Edises Edizioni S.r.l. - Napoli

9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
2028		2027		2026		2025		2024	2023

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 tito-
lare del copyright e resta comunque a disposizione di tutti
gli eventuali aventi diritto.*

Fotocomposizione:

V colore – Pordenone

Stampato presso la:

Tipolitografia Sograte – Zona Ind. Regnano – Città di Castello (PG)

per conto della

Edises Edizioni S.r.l. - Napoli

www.edisesuniversita.it

assistenza.edises.it

ISBN 978 88 3623 125 6

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 sulla piattaforma assistenza.edises.it.

Prefazione

Questo volume è il risultato di una esperienza di alcuni decenni nell'insegnamento della Fisica in Corsi di indirizzo sanitario. Nel volume si è cercato di soddisfare le seguenti esigenze, ritenute fondamentali e prioritarie:

- la funzione della Fisica negli studi di indirizzo sanitario deve essere principalmente di carattere formativo e metodologico, pur non ignorando l'aspetto informativo;
- è utile svolgere una certa integrazione e armonizzazione della Fisica con altri argomenti facenti parte più specificamente dei curricula degli studi sanitari;
- bisogna mettere in risalto l'aspetto strumentale che deriva da 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 corsi collaterali di insegnamento, nel proseguimento degli studi in corsi magistrali e nell'attività futura in ambiente sanitario.

Per conciliare l'esigenza di un corso metodologico e formativo con l'integrazione della Fisica nel curriculum di studi biosanitari (compreso l'ultimo insegnamento: la sicurezza delle persone e dell'ambiente), si è scelto di alternare capitoli che riportano i concetti fondamentali della Fisica (con qualche sporadica applicazione medico-biologica) con capitoli dedicati interamente alle applicazioni di tali concetti in campo biomedico e con alcuni accenni in campo ambientale. 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 ad 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 sanitario e/o ambientale.

Per mantenere il necessario rigore nella trattazione si è fatto uso di alcune nozioni di Analisi matematica riguardanti il calcolo vettoriale e lo studio di alcune funzioni in termini semplificati, nozioni che dovrebbero essere impartite nella Scuola secondaria.

Al fine di proporre un testo completo, che possa essere 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, molecolare e nucleare, ed è stato aggiunto un ultimo capitolo in cui vengono descritte la radioattività naturale e le radiazioni ionizzanti impiegate nelle strutture sanitarie (radiodiagnostica, radioterapia) con le conseguenti misure di radioprotezione da adottare.

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 gli Autori 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. Dopo aver trattato la Fisica dei fenomeni ondulatori in generale, sono svolte le loro applicazioni nel caso delle onde meccaniche (suono) e, dopo aver introdotto le nozioni relative ai fenomeni elettrici e magnetici, delle onde elettromagnetiche. In seguito vengono trattate la struttura della materia e le radiazioni corpuscolari e nei capitoli successivi le conseguenze delle radiazioni sull'uomo con le relative applicazioni diagnostiche, terapeutiche e tecnologiche in generale, aggiornate ai più recenti sviluppi tecnologici.

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 e per la sua carriera futura.

Pavia, 2015

D. Scannicchio
E. Giroletti

In aggiunta alle considerazioni e alle descrizioni riportate nella prefazione alla I Edizione, in questa II Edizione sono state svolte con un certo dettaglio nozioni di equilibrio della mandibola (Capitolo 5), riportando in particolare le differenze fra rettili e mammiferi e per questi ultimi tra carnivori ed erbivori. Ne consegue che l'impiego del testo viene esteso ai corsi di studio odontoiatrici. Inoltre, in questa II Edizione le nozioni di dosimetria e radioprotezione negli ultimi capitoli sono state aggiornate alle più recenti disposizioni nazionali e internazionali in materia.

Pavia, 2023

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

E. Giroletti
Esperto di radioprotezione di 3° grado
e specialista in Fisica Medica
Docente di Elementi di radioprotezione
Corso di Laurea magistrale in Scienze fisiche
Università degli Studi di Pavia

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 riquadri con sfondo arancione;
- gli Esempi con calcoli numerici sono separati dalla trattazione e introdotti alla fine dell'argomento trattato nel paragrafo;
- alla fine di ogni capitolo è riportato un riepilogo delle grandezze fisiche (e loro unità di misura) introdotte nel capitolo;
- alla fine del capitolo sono proposti quesiti e problemi (il cui risultato è riportato in Appendice);
- il testo, le figure e le didascalie adottano la seguente simbologia:
 1. le grandezze vettoriali sono riportate in grassetto (grassetto corsivo solo per posizione, spostamento (o distanze), velocità e accelerazione);
 2. le grandezze scalari o il modulo di vettori sono riportati con carattere normale corsivo.

Indice generale

Capitolo 1

Grandezze fisiche e loro misura. Cenni di Geometria e di Analisi matematica

1.1	INTRODUZIONE	1
1.2	DEFINIZIONE DI UNA GRANDEZZA FISICA E SUE DIMENSIONI	1
1.3	SISTEMI DI UNITÀ DI MISURA E COSTANTI FONDAMENTALI	2
1.4	GRANDEZZE SCALARI E GRANDEZZE VETTORIALI	5
1.4	Somma e differenza di vettori e prodotti scalare e vettoriale	7
<i>Esempio 1.1</i>	<i>Somma di vettori</i>	9
1.5	CENNI DI GEOMETRIA E DI ANALISI MATEMATICA	9
1.5a	Concetto di funzione e sua rappresentazione grafica	10
1.5b	Funzione lineare e sue proprietà	11
<i>Esempio 1.2</i>	<i>Moto rettilineo uniforme</i>	12
1.5c	Funzione esponenziale e sue proprietà. Funzione logaritmica	12
<i>Esempio 1.3</i>	<i>Sviluppo di colonie batteriche</i>	13
1.5d	Funzioni trigonometriche	13
<i>Esempio 1.4</i>	<i>Risoluzione di triangoli</i>	15
1.6	CENNI DI METODOLOGIA DELLA MISURA E DI TEORIA DELL'ERRORE	16
	RIEPILOGO DI GRANDEZZE FISICHE E UNITÀ DI MISURA	16
	PROBLEMI	16

Capitolo 2

Fondamenti della Meccanica

Parte I: Basi della Cinematica e della Dinamica traslatoria

2.1	INTRODUZIONE	17
2.2	CINEMATICA	17
2.2a	Traiettoria e legge oraria	18
2.2b	Velocità e accelerazione	18
2.2c	Legge oraria di alcuni semplici moti	20
<i>Esempio 2.1</i>	<i>Legge oraria: moto rettilineo uniformemente accelerato</i>	23
<i>Esempio 2.2</i>	<i>Moto circolare uniforme</i>	23
2.3	FORZE E LEGGI DELLA DINAMICA	24
2.3a	Forze	24
2.3b	Principi della Dinamica traslatoria	24
2.4	TEOREMA DELL'IMPULSO	27
<i>Esempio 2.3</i>	<i>Teorema dell'impulso</i>	28

2.5	CAMPI DI FORZE: IL CAMPO GRAVITAZIONALE	28
<i>Esempio 2.4</i>	<i>Forza gravitazionale tra due protoni nel nucleo dell'atomo</i>	30
<i>Esempio 2.5</i>	<i>2° principio della Dinamica</i>	30
2.6	MASSA, PESO E DENSITÀ	31
	RIEPILOGO DI GRANDEZZE FISICHE E UNITÀ DI MISURA	32
	PROBLEMI	32

Capitolo 3

Fondamenti della Meccanica

Parte II: Applicazioni della Dinamica traslatoria

3.1	INTRODUZIONE	33
3.2	DALLE FORZE ALLA LEGGE ORARIA	33
3.2a	Moto inerziale in assenza di forze	34
3.2b	Moto in un campo di forze uniforme	34
<i>Esempio 3.1</i>	<i>Moto parabolico</i>	35
3.2c	Moto in un campo di forze elastiche (moto armonico)	35
3.3	LAVORO, ENERGIA, POTENZA E RENDIMENTO	36
3.3a	Energia cinetica e teorema dell'energia cinetica	37
3.3b	Campi conservativi, energia potenziale e conservazione dell'energia meccanica	38
3.3c	Potenza e rendimento	40
<i>Esempio 3.2</i>	<i>Conservazione dell'energia meccanica</i>	41
	RIEPILOGO DI GRANDEZZE FISICHE E UNITÀ DI MISURA	41
	PROBLEMI	41

Capitolo 4

Fondamenti della Meccanica

Parte III: Elementi di Statica e di Dinamica rotatoria.

Corpi deformabili e attrito

4.1	INTRODUZIONE	43
4.2	EQUILIBRIO DI UN CORPO RIGIDO	43
4.3	VINCOLI E LEVE	45
4.4	CENTRO DI MASSA E BARICENTRO	47
4.5	CENNI DI DINAMICA DEL CORPO RIGIDO (TRASLATORIA E ROTATORIA)	48
<i>Esempio 4.1</i>	<i>Conservazione del momento angolare</i>	50
4.6	ELASTICITÀ E LEGGE DI HOOKE	50
4.7	FORZE DI ATTRITO	52
<i>Esempio 4.2</i>	<i>Forze di attrito su un'autovettura in curva</i>	53
	RIEPILOGO DI GRANDEZZE FISICHE E UNITÀ DI MISURA	53
	PROBLEMI	54

Capitolo 5

Biomeccanica

5.1	INTRODUZIONE	55
5.2	EQUILIBRIO DI ARTICOLAZIONI	55
<i>Esempio 5.1</i>	<i>Equilibrio dell'anca con ausilio del bastone</i>	<i>58</i>
5.3	LEVE DEL CORPO UMANO	59
<i>Esempio 5.2</i>	<i>Equilibrio del piede in sollevamento</i>	<i>61</i>
5.4	CARRUCOLE E PULEGGE IN MEDICINA	61
5.5	MANDIBOLA NEGLI ANIMALI	62
5.6	LEGGE DI HOOKE APPLICATA A FRATTURE OSSEE	65
<i>Esempio 5.3</i>	<i>Sforzo compressivo nella caduta</i>	<i>66</i>
5.7	MECCANICA DELLA LOCOMOZIONE	67
	RIEPILOGO DI GRANDEZZE FISICHE E UNITÀ DI MISURA	70
	PROBLEMI	70

Capitolo 6

Meccanica dei fluidi

6.1	INTRODUZIONE	71
<i>Esempio 6.1</i>	<i>Forza di pressione relativa</i>	<i>72</i>
6.2	EQUILIBRIO NEI FLUIDI (GAS E LIQUIDI)	72
<i>Esempio 6.2</i>	<i>Spinta di Archimede su un iceberg</i>	<i>74</i>
<i>Esempio 6.3</i>	<i>Pressione idrostatica</i>	<i>74</i>
6.3	MOTO DEI FLUIDI: PORTATA ED EQUAZIONE DI CONTINUITÀ	75
<i>Esempio 6.4</i>	<i>Potenza da caduta d'acqua</i>	<i>76</i>
6.4	FLUIDI NON VISCOSI: IL TEOREMA DI BERNOULLI	76
6.5	FLUIDI VISCOSI: MOTO LAMINARE E MOTO TURBOLENTO	77
6.6	FORZE DI COESIONE E TENSIONE SUPERFICIALE	80
6.7	APPLICAZIONI DELLA TENSIONE SUPERFICIALE	83
	6.7a Contatto fluido-superficie solida	83
	6.7b Flottazione	83
	6.7c Liquidi tensioattivi	84
	6.7d Fenomeni di capillarità	84
<i>Esempio 6.5</i>	<i>Galleggiamento di un insetto</i>	<i>85</i>
6.8	TENSIONE ELASTICA DI UNA MEMBRANA E FORMULA DI LAPLACE	85
	RIEPILOGO DI GRANDEZZE FISICHE E UNITÀ DI MISURA	87
	PROBLEMI	87

Capitolo 7

Meccanica dei fluidi nei sistemi biologici

7.1	INTRODUZIONE	89
7.2	CIRCUITO IDRODINAMICO DEL SANGUE	90
	7.2a Portata dei vasi e velocità del sangue	90
	7.2b Applicazioni del teorema di Bernoulli	93
	7.2c Misure di flusso	93
<i>Esempio 7.1</i>	<i>Velocità del sangue</i>	<i>93</i>
7.3	VISCOSITÀ DEL SANGUE	95
	7.3a Composizione del sangue	95
	7.3b Comportamento viscoso normale	95
	7.3c Anomalie della viscosità del sangue	96
7.4	RESISTENZA DEI VASI E VARIAZIONE DI PRESSIONE NEL SISTEMA CIRCOLATORIO	98
	7.4a Resistenza dei vasi	98
	7.4b Effetto della pressione idrostatica	99
7.5	LAVORO E POTENZA CARDIACA	101
	7.5a Pompa cardiaca	101
	7.5b Ciclo cardiaco	102
7.6	MISURA DELLA PRESSIONE DEL SANGUE	104
	RIEPILOGO DI GRANDEZZE FISICHE E UNITÀ DI MISURA	106
	PROBLEMI	106

Capitolo 8

Distensibilità e pulsatilità

8.1	INTRODUZIONE	107
8.2	APPLICAZIONI DELLA TENSIONE SUPERFICIALE AI SISTEMI BIOLOGICI: EMBOLIA GASSOSA	107
8.3	CARATTERISTICHE ELASTICHE DELLE PARETI DEI VASI	108
8.4	RAGGIO DI EQUILIBRIO DEI VASI	108
8.5	EFFETTI IDRODINAMICI DELLA DISTENSIBILITÀ DEI VASI	110
	8.5a Considerazioni generali	110
	8.5b Moto pulsatile e impedenza meccanica	113
8.6	FORMULA DI LAPLACE E FUNZIONALITÀ CARDIACA	114
	RIEPILOGO DI GRANDEZZE FISICHE E UNITÀ DI MISURA	116
	PROBLEMI	116

Capitolo 9

Trasporto in regime viscoso

9.1	INTRODUZIONE	117
9.2	SEDIMENTAZIONE	118
9.3	ELETTROFORESI	120
9.4	CENTRIFUGAZIONE	122
9.5	CENTRIFUGHE PREPARATIVE E CENTRIFUGHE ANALITICHE	124
	RIEPILOGO DI GRANDEZZE FISICHE E UNITÀ DI MISURA	125
	PROBLEMI	125

Capitolo 10

Termologia e Termodinamica

10.1	INTRODUZIONE	127
10.2	SISTEMA E STATO TERMODINAMICO	128
10.3	TEMPERATURA E SCALE TERMODINAMICHE	128
10.4	ENERGIA INTERNA	130
10.5	CALORE E CALORE SPECIFICO	130
	<i>Esempio 10.1 Equilibrio termico</i>	133
10.6	LAVORO IN TERMODINAMICA	133
10.7	TRASFORMAZIONI TERMODINAMICHE	134
10.8	CONSERVAZIONE DELL'ENERGIA IN TERMODINAMICA: PRIMO PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA	136
10.9	GAS PERFETTI	137
	<i>Esempio 10.2 Riduzione a condizioni NTP</i>	139
10.10	GAS REALI	140
10.11	ENTALPIA	141
10.12	SECONDO PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA. ENTROPIA ED ENERGIA LIBERA	142
	<i>Esempio 10.3 Variazione di entropia</i>	144
	RIEPILOGO DI GRANDEZZE FISICHE E UNITÀ DI MISURA	144
	PROBLEMI	144

Capitolo 11

Termodinamica nei sistemi biologici

11.1	INTRODUZIONE	145
------	--------------	-----

11.2	MECCANISMI DI TRASMISSIONE DEL CALORE	145
	11.2a Convezione del calore	145
	11.2b Conduzione del calore	146
	<i>Esempio 11.1 Conduzione di calore e variazione di entropia</i>	147
	11.2c Irraggiamento termico	147
	<i>Esempio 11.2 Irraggiamento del corpo umano</i>	150
11.3	METABOLISMO BASALE	150
11.4	TERMOREGOLAZIONE DEGLI ANIMALI A SANGUE CALDO	151
	11.4 Umidità ambiente	152
	RIEPILOGO DI GRANDEZZE FISICHE E UNITÀ DI MISURA	153
	PROBLEMI	154

Capitolo 12

Fenomeni ondulatori

12.1	INTRODUZIONE	155
12.2	ONDE	155
12.3	MOTO ARMONICO E OSCILLATORE ARMONICO	158
	<i>Esempio 12.1 Vibrazione di una corda</i>	160
12.4	OSCILLAZIONI SMORZATE E FORZATE	160
12.5	ANALISI DI FOURIER	161
12.6	RIFLESSIONE, RIFRAZIONE E RIFLESSIONE TOTALE	162
12.7	EFFETTO DOPPLER	163
	<i>Esempio 12.2 Suono da una sirena su un'automobile</i>	165
12.8	POLARIZZAZIONE DELLE ONDE TRASVERSALI	165
	RIEPILOGO DI GRANDEZZE FISICHE E UNITÀ DI MISURA	166
	PROBLEMI	166

Capitolo 13

Fisica delle onde elastiche e applicazioni biomediche

13.1	INTRODUZIONE	167
13.2	SUONO	167
13.3	PROPAGAZIONE DELLE ONDE SONORE	168
	13.3a Pressione sonora	168
	13.3b Intensità sonora e direzionalità del suono	169
	<i>Esempio 13.1 Suono da un altoparlante</i>	170
	<i>Esempio 13.2 Intensità sonora a NTP</i>	171
	<i>Esempio 13.3 Massima pressione sonora tollerabile</i>	171

13.3c	Infrasuoni e ultrasuoni	171
13.4	LIVELLI DI SENSAZIONE SONORA	172
<i>Esempio 13.4</i>	<i>Sensibilità sonora dell'orecchio</i>	<i>175</i>
13.5	RICEZIONE DI ONDE ELASTICHE NEI SISTEMI BIOLOGICI	175
13.6	FONAZIONE	178
13.7	STETOSCOPIO	179
13.8	IMPIEGO DEGLI ULTRASUONI IN MEDICINA	180
13.8a	Ultrasuoni nella terapia medica	182
13.8b	Ultrasuoni nella diagnostica medica	182
<i>Esempio 13.5</i>	<i>Flussimetria Doppler</i>	<i>184</i>
	RIEPILOGO DI GRANDEZZE FISICHE E UNITÀ DI MISURA	184
	PROBLEMI	185

Capitolo 14

Diffusione, filtrazione e osmosi

14.1	INTRODUZIONE	187
14.2	MEMBRANE NEI SISTEMI BIOLOGICI	188
14.3	FENOMENO DELLA DIFFUSIONE	191
14.4	DIFFUSIONE LIBERA E ATTRAVERSO MEMBRANE	193
<i>Esempio 14.1</i>	<i>Numero di pori e superfici di membrane biologiche (capillare e alveolare)</i>	<i>197</i>
14.5	FILTRAZIONE	197
14.6	EQUILIBRI GAS-LIQUIDO	199
14.7	MEMBRANE SEMIPERMEABILI ED EQUILIBRI OSMOTICI	201
14.8	LAVORO OSMOTICO E POTENZIALE CHIMICO	205
14.9	EQUILIBRI OSMOTICI NEI SISTEMI BIOLOGICI	206
<i>Esempio 14.2</i>	<i>Accumulo di liquidi nei tessuti (edema)</i>	<i>210</i>
<i>Esempio 14.3</i>	<i>Lavoro osmotico per concentrare l'urea e metabolismo renale</i>	<i>211</i>
	RIEPILOGO DI GRANDEZZE FISICHE E UNITÀ DI MISURA	212
	PROBLEMI	212

Capitolo 15

Fenomeni elettrici

15.1	INTRODUZIONE	213
15.2	CARICA ELETTRICA E FORZA DI COULOMB	213
<i>Esempio 15.1</i>	<i>Repulsione elettrostatica tra protoni</i>	<i>215</i>
15.3	CAMPO ELETTRICO E POTENZIALE ELETTROSTATICO	215

15.4	DISTRIBUZIONI DI CARICHE ELETTRICHE: DIPOLO ELETTRICO	217
15.5	CAPACITÀ DI UN CONDUTTORE. CONDENSATORE	218
15.6	CORRENTE ELETTRICA E LEGGI DI OHM	221
15.7	SOLUZIONI ELETTROLITICHE E DISSOCIAZIONE ELETTROLITICA	224
<i>Esempio 15.2</i>	<i>Soluzioni elettrolitiche</i>	<i>225</i>
<i>Esempio 15.3</i>	<i>Concentrazione di ioni idrogeno nell'acqua pura e pH</i>	<i>226</i>
15.8	EFFETTO TERMICO DELLA CORRENTE ELETTRICA	228
	RIEPILOGO DI GRANDEZZE FISICHE E UNITÀ DI MISURA	227
	PROBLEMI	227

Capitolo 16

Fenomeni elettrici nei sistemi biologici

16.1	INTRODUZIONE	229
16.2	FLUSSI ELETTROCHIMICI	230
16.3	POTENZIALI ED EQUILIBRI ELETTROCHIMICI	231
16.4	MEMBRANA CAPILLARE	232
16.5	MEMBRANA CELLULARE: POTENZIALE DI RIPOSO E MECCANISMI DI TRASPORTO PASSIVO	234
16.6	POMPA SODIO-POTASSIO	237
<i>Esempio 16.1</i>	<i>Rapporto P_{Na}/P_K in cellule eccitabili</i>	<i>238</i>
16.7	ATTIVITÀ BIOELETTRICHE NEI SISTEMI BIOLOGICI	239
16.8	POTENZIALE D'AZIONE	240
16.9	PROPAGAZIONE DEL POTENZIALE D'AZIONE	243
16.10	TRACCIATI ECG, EEG ED EMG	246
	RIEPILOGO DI GRANDEZZE FISICHE E UNITÀ DI MISURA	247
	PROBLEMI	247

Capitolo 17

Elettromagnetismo

17.1	INTRODUZIONE	249
17.2	CAMPO MAGNETICO	249
<i>Esempio 17.1</i>	<i>Intensità del campo di forza magnetico</i>	<i>252</i>
17.3	FORZA DI LORENTZ E MOTO DI UNA PARTICELLA CARICA IN UN CAMPO MAGNETICO UNIFORME	252

17.4	MOMENTI MAGNETICI E PROPRIETÀ MAGNETICHE DELLA MATERIA	253
<i>Esempio 17.2</i>	<i>Campo magnetico di una bobina</i>	<i>255</i>
17.5	FLUSSO DI CAMPO MAGNETICO E INDUZIONE ELETTROMAGNETICA	256
17.6	FENOMENO DELL'AUTOINDUZIONE E CIRCUITI IN CORRENTE ALTERNATA	256
17.7	TRASFORMATORE	259
<i>Esempio 17.3</i>	<i>Circuito RLC</i>	<i>259</i>
<i>Esempio 17.4</i>	<i>Applicazione del trasformatore: il defibrillatore cardiaco</i>	<i>259</i>
17.8	ONDE ELETTROMAGNETICHE	260
17.9	EMISSIONE E ASSORBIMENTO DELLE ONDE ELETTROMAGNETICHE	262
RIEPILOGO DI GRANDEZZE FISICHE E UNITÀ DI MISURA		264
PROBLEMI		264

Capitolo 18

Optica fisica e Optica geometrica

18.1	INTRODUZIONE	265
18.2	ONDE ELETTROMAGNETICHE	265
18.3	DIFFRAZIONE DELLA LUCE	267
18.4	PRISMA E DISPERSIONE DELLA LUCE	269
<i>Esempio 18.1</i>	<i>Rifrazione nel vetro</i>	<i>271</i>
<i>Esempio 18.2</i>	<i>Angolo limite</i>	<i>271</i>
18.5	POLARIZZAZIONE DELLA LUCE	272
18.6	LUCE COERENTE	274
18.7	DIOTTRO	274
18.8	LENTI SOTTILI	277
<i>Esempio 18.3</i>	<i>Lente sottile in aria e in acqua</i>	<i>279</i>
<i>Esempio 18.4</i>	<i>Potere diottrico della cornea e del cristallino</i>	<i>280</i>
	18.8a Costruzione dell'immagine da una lente sottile	280
	18.8b Ingrandimento lineare	281
18.9	DIFETTI DELLE LENTI: ABERRAZIONI	282
NOTA 18.1	Inversione destra-sinistra	282
RIEPILOGO DI GRANDEZZE FISICHE E UNITÀ DI MISURA		283
PROBLEMI		283

Capitolo 19

Strumentazione ottica in Medicina e funzione visiva

19.1	INTRODUZIONE	285
19.2	LUCE POLARIZZATA E POTERE ROTATORIO	285

<i>Esempio 19.1</i>	<i>Misura della concentrazione con il polarimetro</i>	<i>287</i>
19.3	ASSORBIMENTO OTTICO E SPETTROFOTOMETRIA	287
19.4	MICROSCOPIO	289
	19.4a Microscopio semplice	289
<i>Esempio 19.2</i>	<i>Lente di ingrandimento</i>	<i>290</i>
	19.4b Microscopio composto	290
19.5	FIBRE OTTICHE E LORO UTILIZZAZIONE IN DIAGNOSTICA MEDICA	293
19.6	OCCHIO E SUO POTERE SEPARATORE	294
	19.6a Descrizione anatomica	294
	19.6b Occhio come sistema ottico	295
	19.6c Acuità visiva	297
19.7	DIFETTI OTTICI DELL'OCCHIO	297
<i>Esempio 19.3</i>	<i>Difetto da punto remoto</i>	<i>299</i>
<i>Esempio 19.4</i>	<i>Difetto da punto prossimo</i>	<i>299</i>
19.8	MECCANISMO DELLA VISIONE E PERCEZIONE DEI COLORI	299
	19.8a Retina	299
	19.8b Fotorecettori e cellule elaboratrici	301
	19.8c Meccanismo della visione	303
<i>Esempio 19.5</i>	<i>Massima distanza di visibilità</i>	<i>304</i>
	19.8d Triangolo del colore e visione cromatica	301
<i>Esempio 19.6</i>	<i>Triangolo del colore</i>	<i>307</i>
RIEPILOGO DI GRANDEZZE FISICHE E UNITÀ DI MISURA		308
PROBLEMI		308

Capitolo 20

Materia e radiazioni

20.1	INTRODUZIONE	309
20.2	ATOMI	309
20.3	MECCANICA ONDULATORIA	312
20.4	STRUTTURA ATOMICA E MOLECOLARE. STATI DELLA MATERIA	312
20.5	RADIAZIONE ELETTROMAGNETICA	315
20.6	NUCLEI E FORZE NUCLEARI	316
20.7	RADIOATTIVITÀ	317
20.8	LEGGE DEL DECADIMENTO RADIOATTIVO	318
<i>Esempio 20.1</i>	<i>Decadimento radioattivo del cobalto-60</i>	<i>320</i>
20.9	ASSORBIMENTO DELLE RADIAZIONI NELLA MATERIA	320
RIEPILOGO DI GRANDEZZE FISICHE E UNITÀ DI MISURA		320
PROBLEMI		320

Capitolo 21

Radiazioni elettromagnetiche in Medicina

21.1	INTRODUZIONE	321
21.2	RADIAZIONE ELETTROMAGNETICA ED EMISSIONE TERMICA	321
21.3	ONDE ELETTROMAGNETICHE IN MEDICINA	323
21.3a	Campi elettromagnetici a bassa frequenza, radiofrequenza e microonde	323
21.3b	Microonde in Medicina	324
21.3c	Radiazione infrarossa	324
21.3d	Radiazione visibile. Dispositivi laser in Medicina	325
21.3e	Raggi ultravioletti	326
21.3f	Effetti biologici dei raggi ultravioletti	328
<i>Esempio 21.1</i>	<i>Emissione di UVA</i>	<i>329</i>
21.4	RAGGI X E LORO PRODUZIONE	329
21.4a	Tubo a raggi X	325
21.4b	Produzione e spettro dei raggi X	331
<i>Esempio 21.2</i>	<i>Produzione di raggi X</i>	<i>333</i>
21.5	RAGGI X IN DIAGNOSTICA MEDICA	333
21.5a	Assorbimento dei raggi X	333
21.5b	Immagine radiologica	335
21.6	RADIAZIONE GAMMA	336
	RIEPILOGO DI GRANDEZZE FISICHE E UNITÀ DI MISURA	337
	PROBLEMI	337

Capitolo 22

Radiazioni ionizzanti: radiodiagnostica, radioterapia e radioprotezione

22.1	INTRODUZIONE: LA IONIZZAZIONE	339
22.2	ASSORBIMENTO DELLA RADIAZIONE IONIZZANTE NELLA MATERIA (CORPUSCOLARE, X E GAMMA)	339
22.2a	Dosimetria	340
22.2b	Assorbimento dei fotoni gamma	342
22.2c	Assorbimento della radiazione corpuscolare	343
22.2d	Confronto fra diverse radiazioni	344
22.3	EFFETTI BIOLOGICI DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI	345

22.3a	Effetti biologici macroscopici della radiazione ionizzante	348
<i>Esempio 22.1</i>	<i>Avvelenamento da polonio radioattivo (il caso Litvinenko)</i>	<i>348</i>
<i>Esempio 22.2</i>	<i>Effetto termico della radiazione ionizzante</i>	<i>349</i>
22.3b	Sterilizzazione mediante radiazioni ionizzanti	349
22.4	RADIAZIONI IONIZZANTI IN DIAGNOSTICA	349
22.4a	Radiodiagnostica con raggi X	349
22.4b	Radiodiagnostica con l'impiego di radionuclidi	351
<i>Esempio 22.3</i>	<i>Periodo di dimezzamento effettivo</i>	<i>352</i>
22.4c	Immagini tomografiche: introduzione e ricostruzione	353
<i>Esempio 22.4</i>	<i>Proiezioni tomografiche</i>	<i>355</i>
22.4d	Tomografie computerizzate ai raggi X (TC)	355
22.4e	Tomografie SPECT (Single Photon Emission Computed Tomography) e PET (Positron Emission Tomography)	358
22.4f	Tomografie a risonanza magnetica (RM)	362
<i>Esempio 22.5</i>	<i>Energia assorbita nella RM</i>	<i>365</i>
22.5	RADIAZIONI IONIZZANTI IN RADIOTERAPIA	366
22.5a	Premessa	366
22.5b	Radioterapia convenzionale e adroterapia	366
22.6	RADIAZIONE IONIZZANTE NELL'AMBIENTE	370
22.6a	Radiazione naturale	370
22.6b	Radiazione ambientale da attività umana (antropica)	371
22.7	CENNI DI RADIOPROTEZIONE	371
22.7a	Principi fondamentali di radioprotezione	372
22.7b	Misure di tutela	373
22.7c	Altri aspetti di radioprotezione	374
	RIEPILOGO DI GRANDEZZE FISICHE E UNITÀ DI MISURA	375
	PROBLEMI	376

APPENDICE

Risposte ai problemi	A-1
Indice analitico	I-1

Fisica delle onde elastiche e applicazioni biomediche

13.1 INTRODUZIONE

In questo capitolo vengono svolti i dettagli della propagazione delle onde elastiche nei materiali gassosi, liquidi o solidi, le cui proprietà hanno applicazione in Biologia e Medicina nella formazione e nella rivelazione di suoni da parte dei sistemi biologici, originando un fondamentale mezzo di comunicazione tra gli esseri viventi. Lo sfruttamento delle onde elastiche inoltre ha comportato in Medicina importanti sviluppi tecnologici nei dispositivi diagnostici (ecografie e altro) e terapeutici. Come vedremo, la descrizione delle onde elastiche, in pratica di carattere meccanico, si avvale delle nozioni di Meccanica svolte nei Capitoli 2 e 3.

13.2 SUONO

Quando in una regione limitata di un mezzo materiale viene prodotta una piccola deformazione di carattere meccanico, si generano delle forze di reazione che tendono a riportare le particelle del mezzo nella posizione di equilibrio. Se il mezzo materiale è dotato di sufficiente deformabilità, le forze di reazione sono di tipo elastico, cioè proporzionali alla deformazione. Le particelle del mezzo, essendo sottoposte a forze di richiamo di tipo elastico, si muovono quindi di *moto armonico* intorno alla posizione di equilibrio. Questo moto vibratorio, come abbiamo visto nel precedente capitolo, si propaga, a causa dell'interazione esistente tra le particelle del mezzo, con una velocità che dipende in generale dalla natura del mezzo, dalla direzione di propagazione, se questo non è isotropo, e dal carattere trasversale o longitudinale della vibrazione. I concetti di suono e di onda sonora sono appunto collegati alla possibilità di percepire, mediante l'organo dell'udito, determinate vibrazioni elastiche.

Il suono dunque consiste nella propagazione di onde meccaniche elastiche nei mezzi materiali. Se il mezzo è un gas o un liquido, le onde sonore sono longitudinali. Nei solidi, invece, si possono avere sia onde trasversali (come nelle corde musicali), sia onde longitudinali. Infine, alle superfici di interfaccia tra mezzi diversi le onde sonore sono sempre trasversali (come negli strumenti musicali a percussione).

L'orecchio umano è in grado di percepire solo onde meccaniche elastiche, che si propagano nell'aria, la cui frequenza sia compresa tra circa 20 Hz e $2 \cdot 10^4$ Hz. È appunto in questo intervallo che le vibrazioni meccaniche sono chiamate *suoni*; al di fuori di questa gamma di frequenze le vibrazioni elastiche non sono percepibili dall'orecchio umano, pur avendo sempre le stesse caratteristiche

delle onde sonore propriamente dette. Per frequenze superiori ai $2 \cdot 10^4$ Hz le vibrazioni vengono dette **ultrasuoni** e per frequenze inferiori ai 20 Hz sono dette **infrasuoni**.

Poiché la velocità del suono in aria è di circa 344 m/s,¹ la lunghezza delle onde udibili dall'orecchio umano è ricavabile dalla relazione (12.2) e risulta compresa fra 17.2 m e 1.72 cm. A titolo di confronto, la velocità delle onde elastiche nell'acqua è di circa 1450 m/s, mentre nel ferro è di circa 5130 m/s.

È opportuno fare una differenza tra suoni e rumori. Questi ultimi sono dovuti a vibrazioni del tutto irregolari alle quali, come tali, manca un preciso carattere di periodicità. I suoni invece, se sono **puri**, sono dovuti a una vibrazione armonica semplice, mentre, se sono **complessi**, derivano da una sovrapposizione di onde semplici.

Tipici esempi di suoni complessi sono i suoni musicali e i suoni vocali. Mediante l'analisi di Fourier si dimostra che un suono complesso $f(t)$ è scomponibile nella somma (12.10) di un numero finito o infinito di componenti sinusoidali semplici (armoniche). Un suono generico si può quindi considerare come la sovrapposizione di un numero finito o infinito di suoni puri. Il suono puro componente di più bassa frequenza viene chiamato primo armonico o fondamentale, mentre gli altri prendono il nome di armonici superiori e hanno frequenze che sono multiple della frequenza fondamentale.

L'**altezza** di un suono puro dipende dalla **frequenza** delle vibrazioni e aumenta con questa. In un suono complesso la frequenza fondamentale coincide con la periodicità della vibrazione complessa e quindi caratterizza l'altezza del suono.

Il **timbro** del suono dipende dalla **forma** della vibrazione e quindi dal numero e dall'ampiezza delle vibrazioni armoniche semplici che lo compongono.

L'**intensità** di un suono, definita in termini generali nel §12.2, dipende dall'energia trasportata dall'onda sonora e questa, come visto nel §12.3, dipende a sua volta dalla somma dei quadrati delle ampiezze delle vibrazioni semplici componenti il suono complesso. Questa ampiezza è massima in prossimità della sorgente della vibrazione sonora e diminuisce via via che l'onda si allontana da essa, come è evidente nella Figura 12.6, relativa al caso di superfici d'onda sferiche. Torneremo su questo punto nel paragrafo 13.3b.

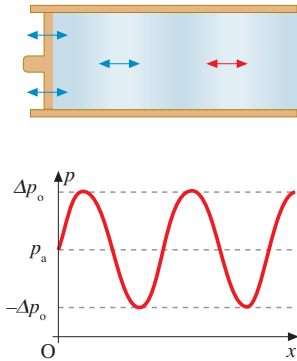


Figura 13.1

Figura schematica di zone di compressione e rarefazione. Nella propagazione di un'onda sonora in un gas, le variazioni di pressione sono determinate dal moto armonico delle molecole del gas. Questo è provocato dallo stantuffo che si muove avanti e indietro di moto armonico.

13.3 PROPAGAZIONE DELLE ONDE SONORE

13.3a Pressione sonora

Le forze elastiche che agiscono sulle particelle di gas (atomi o molecole) ne causano una compressione e quindi anche rarefazioni successive: dunque nei gas la propagazione di una perturbazione oscillatoria dà luogo a zone di compressione e zone di rarefazione (Figura 13.1) per cui, dal punto di vista meccanico, il suono determina anche una variazione della pressione *istantanea*, la quale per suoni semplici segue una legge di tipo sinusoidale simile alla (12.3):

$$\Delta p(t) = \Delta p_o \sin(\omega t + \phi) \quad (13.1)$$

dove $\Delta p = p - p_a$ è la variazione istantanea della pressione p rispetto alla pressione atmosferica p_a e Δp_o è l'ampiezza della perturbazione pressoria.

¹ In generale la velocità del suono in aria dipende dalla temperatura.

La funzione $\Delta p(t)$ prende il nome di **pressione sonora istantanea**. La sua variazione sinusoidale, con successive compressioni (pressioni relative positive) e rarefazioni (pressioni relative negative), è in grado, come vedremo, di porre in vibrazione una membrana (come il timpano). In questi paragrafi vogliamo arrivare a individuare una relazione fra l'intensità sonora e la pressione sonora.

Si può dimostrare che si ottiene la seguente relazione fra le relative ampiezze di vibrazione:

$$\Delta p_o = A \omega v d, \quad (13.2)$$

dove A è l'ampiezza della compressione (nel caso sia sinusoidale) (Figura 13.2), v è la velocità dell'onda nel gas, d la densità del gas in questione e dove abbiamo tenuto conto che l'ampiezza della velocità del moto oscillante è data da $A \omega$, come visto nella (12.7).

13.3b Intensità sonora e direzionalità del suono

Riprendiamo ora la nozione di **intensità** I di un'onda sonora, ricordando che essa è stata definita nel precedente capitolo e nel §13.2 come la quantità di energia che attraversa l'area unitaria nell'unità di tempo (oppure come la potenza che attraversa un'area unitaria) e si misura in **watt/m²** (W m^{-2}).

Dalla (12.9) possiamo esprimere l'energia totale E trasportata da un'onda sonora come:

$$E = \frac{1}{2} \omega^2 m A^2 = \frac{1}{2} V \omega^2 A^2 d = \frac{1}{2} S v \Delta t d \omega^2 A^2, \quad (13.3)$$

dove abbiamo sostituito m con l'espressione $d \times V$ e dove abbiamo posto $V = S v \Delta t$, poiché attraverso una superficie di area S , perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda, in un intervallo di tempo Δt , passa una quantità di energia pari a quella contenuta nel parallelepipedo di base S e altezza $v \Delta t$ (Figura 13.3), essendo v la velocità con cui l'onda si propaga.

Dividendo la (13.3) per $S \Delta t$ otteniamo l'intensità sonora:

$$I = \frac{E}{S \Delta t} = \frac{1}{2} v d \omega^2 A^2, \quad (13.4)$$

che possiamo scrivere anche in termini di ampiezza di pressione, utilizzando la (13.2):

$$I = \frac{1}{2} \frac{\Delta p_o^2}{v d}, \quad (13.5)$$

da cui:

$$\Delta p_o = \sqrt{2 I v d}. \quad (13.6)$$

Questa è la relazione esistente tra intensità sonora e ampiezza di pressione sonora.

Come abbiamo visto nel capitolo precedente, una vibrazione, come quella sonora, emessa da una sorgente puntiforme si propaga in tutte le direzioni per onde sferiche. L'intensità è quindi la stessa per tutti i punti che si trovano su una

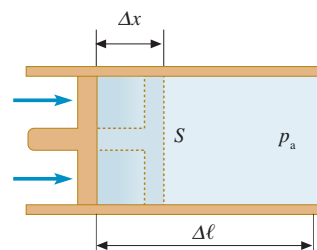


Figura 13.2

Uno stantuffo di sezione S comprime l'aria contenuta nel tubo, che si trova alla pressione atmosferica p_a , originando un'onda di pressione sonora.

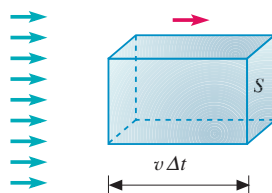


Figura 13.3

Un'onda sonora che si propaga attraverso una superficie S con velocità v percorre, nell'intervallo di tempo Δt , un tratto $v \Delta t$. Il volume attraversato è pertanto $S v \Delta t$.

Intensità sonora

sfera di raggio r e avente per centro la sorgente sonora. Per la conservazione dell'energia, segue che l'intensità sonora su una superficie d'onda sferica è data da:

$$I = \frac{E}{4\pi r^2 \Delta t}, \quad (13.7)$$

per cui I diminuisce con il quadrato della distanza tra sorgente sonora e superficie considerata. Ne segue che due punti, distanti r_1 e r_2 da una sorgente sonora puntiforme, sono investiti rispettivamente da intensità I_1 e I_2 date dal rapporto:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}. \quad (13.8)$$

La soglia del dolore, per l'orecchio umano, corrisponde a un'intensità sonora di circa 1 W/m^2 , circa uguale all'intensità sonora di un martello pneumatico che si trova a 1 metro di distanza dall'orecchio. Dalla (13.8) risulta che, per avere sull'orecchio un'intensità sonora pari a un ambiente acusticamente tranquillo (10^{-6} W/m^2), occorre trovarsi a una distanza dal martello pneumatico non inferiore a 1 km, quando è in funzione.

Direzionalità

Un'altra importante caratteristica della propagazione sonora consiste nella dipendenza della **direzionalità** del suono dalla sua **frequenza**: più elevata è la frequenza tanto maggiore è la collimazione dell'onda sonora emessa dalla sorgente. Per questo motivo è possibile ottenere immagini ecografiche mediante ultrasuoni, cioè suoni ad elevatissima frequenza (1–10 MHz), che si propagano praticamente come un sottile raggio sonoro emesso dalla sorgente.

ESEMPIO 13.1

Suono da un altoparlante

L'altoparlante a bassa frequenza di un impianto stereo (Figura 13.4) ha una superficie di 0.06 m^2 e produce 1 W di potenza acustica. Calcolare: (1) l'intensità nelle immediate vicinanze dell'altoparlante e (2) a quale distanza da esso l'intensità misurata risulterebbe di 0.2 W m^{-2} , se l'altoparlante emettesse uniformemente i suoni nell'emisfera che sta davanti ad esso.

Soluzione (1) Presso l'altoparlante l'intensità sarà:

$$I = \frac{W}{S} = \frac{1 \text{ W}}{0.06 \text{ m}^2} = 16.7 \text{ W m}^{-2}.$$

(2) Alla distanza r dall'altoparlante, l'onda sonora si è propagata su un'emisfera la cui area è $0.5 (4\pi r^2)$ (Figura 13.4) e quindi $I = W / 2\pi r^2$, da cui si ottiene il valore di r al quale si ha $I = 0.2 \text{ W m}^{-2}$:

$$r = \sqrt{\frac{W}{2\pi I}} = \sqrt{\frac{1 \text{ watt}}{2\pi \cdot 0.2 \text{ W m}^{-2}}} = 0.89 \text{ m}.$$

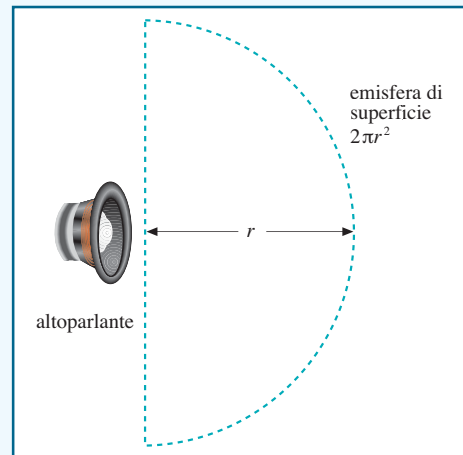


Figura 13.4

Il suono emesso dall'altoparlante si diffonde nella metà frontale della sfera centrata sull'altoparlante.

ESEMPIO 13.2 Intensità sonora a NTP

Calcolare l'intensità di un'onda sonora in aria in condizioni NTP (velocità del suono 331 m s^{-1}) se la sua frequenza è uguale a 1200 Hz e la sua ampiezza è 10^{-5} m .

Si consideri la densità dell'aria $d = 0.001293 \text{ g cm}^{-3}$.

Soluzione Applicando la relazione (13.5) si ottiene:

$$I = \frac{1}{2} v d \omega^2 A^2 = \frac{1}{2} 331 \text{ m s}^{-1} \cdot 0.001293 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-3} \cdot (2\pi)^2 (1200 \text{ Hz})^2 (10^{-5} \text{ m})^2 = 1.21 \text{ watt m}^{-2}.$$

ESEMPIO 13.3 Massima pressione sonora tollerabile

L'ampiezza massima Δp_o di un'onda sonora ancora tollerabile dall'orecchio umano è circa 28 Pa . (1) Quale frazione della pressione atmosferica normale a livello del mare corrisponde a questo valore? (2) A quale intensità sonora corrisponde questo valore di Δp_o in aria, assumendo una densità pari a 1.29 kg m^{-3} e una velocità di 344 m s^{-1} ?

Dunque, anche i suoni molto intensi corrispondono a fluttuazioni di pressione che sono solo una frazione molto piccola della pressione atmosferica.

(2) Applicando la (13.5) si ottiene l'intensità I :

Soluzione (1) Poiché la pressione atmosferica normale è di $1 \text{ atmosfera} = 1.01 \cdot 10^6 \text{ barie} = 1.01 \cdot 10^5 \text{ Pascal}$, abbiamo:

$$I = \frac{\Delta p_o^2}{2dv} = \frac{(28 \text{ Pa})^2}{2(1.29 \text{ kg m}^{-3})(344 \text{ m s}^{-1})} = 0.883 \text{ W m}^{-2}.$$

$$\frac{\Delta p_o}{p} = \frac{28 \text{ Pa}}{1.01 \cdot 10^5 \text{ Pa}} = 2.77 \cdot 10^{-4}.$$

13.3c Infrasuoni e ultrasuoni

Per suoni si intendono le onde elastiche cui l'orecchio umano è sensibile, cioè comprese nell'intervallo di frequenza fra 20 Hz e 20 kHz . Le onde meccaniche con frequenze minori di 20 Hz sono chiamate *infrasuoni*, mentre quelle di frequenze superiori a 20 kHz sono chiamate *ultrasuoni*, come mostrato nella Figura 13.6. Per entrambe queste vibrazioni meccaniche si applica *tutto* quanto svolto nei paragrafi precedenti, in particolare i fenomeni di riflessione, rifrazione, interferenza e diffrazione e possono essere definite grandezze quali la frequenza, la lunghezza d'onda, la velocità di propagazione, l'intensità sonora e l'attenuazione.

Gli *infrasuoni* sono le vibrazioni meccaniche di frequenza inferiore ai 20 Hz , cioè sotto la soglia di udibilità dell'uomo. Lo studio della gamma di frequenze degli infrasuoni si estende dai circa 17 hertz fino al limite minimo di 0.001 hertz . Queste vibrazioni sono caratterizzate dalla capacità di propagarsi su lunghe distanze e di aggirare gli ostacoli con relativamente modesta dissipazione di energia.

Per quanto riguarda gli *ultrasuoni* la frequenza convenzionalmente utilizzata per discriminarli dalle onde soniche è fissata in 20 kilohertz , identificando con suono solo il fenomeno fisico udibile. Come già detto in

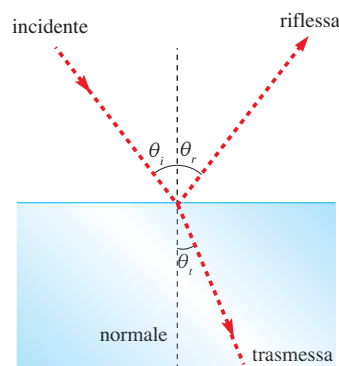
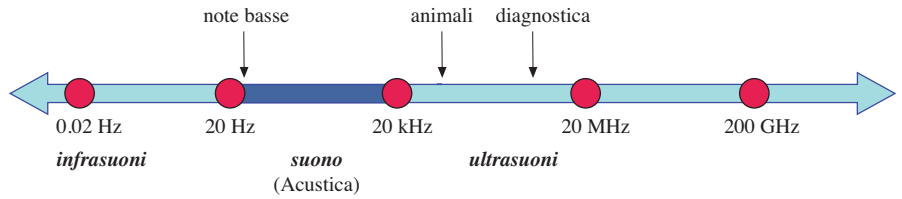


Figura 13.5

Onda sonora incidente, riflessa e trasmessa dal mezzo 1 al mezzo 2.

Figura 13.6

Spettro delle frequenze delle onde meccaniche con i relativi campi di applicazione. La scala della frequenza è logaritmica. I limiti di percezione in frequenza dell'orecchio umano tra 20 Hz e 20 kHz sono approssimativi. L'*Acustica* descrive le caratteristiche dei suoni percepibili dall'orecchio umano.



precedenza gli ultrasuoni hanno la caratteristica di propagarsi con maggiore direzionalità al crescere della frequenza. Essi sono prodotti sia in fenomeni naturali sia artificialmente.

Si possono ottenere e rivelare ultrasuoni con frequenza fino al miliardo di cicli al secondo (1 GHz), cui corrisponde una lunghezza d'onda dell'ordine del μm . Infatti, essendo $\lambda v = v$, si ottiene una lunghezza d'onda in aria ($v \approx 340 \text{ m/s}$) di $0.3 \mu\text{m}$ e in acqua ($v \approx 1450 \text{ m/s}$) di $1.5 \mu\text{m}$. La lunghezza d'onda così piccola di questi ultrasuoni, circa dell'ordine di quella della luce, fa sì che essi si propaghino rettilineamente come la luce, costituendo dei veri e propri raggi sonori: un fascio di simili ultrasuoni è dunque *altamente direzionale* (come affermato alla fine del §12.2).

I generatori di ultrasuoni utilizzati in Medicina o nell'Industria hanno intensità che varia, a seconda dell'utilizzo, fra 10^{-4} W/cm^2 e 10 W/cm^2 . Nel caso dell'estremo superiore delle intensità, utilizzando la (13.5), con ultrasuoni alla frequenza di 10^6 Hz (1 MHz) si provocano ampiezze di pressione di circa 5.5 atmosfere: due punti situati a mezza lunghezza d'onda di distanza (cioè $0.75 \mu\text{m}$ nell'acqua) possono essere sottoposti alla considerevole differenza di pressione istantanea di 11 atmosfere, cui corrisponde un'accelerazione istantanea delle particelle del mezzo, sottoposte a un simile gradiente di pressione, di circa $2.3 \cdot 10^5$ volte l'accelerazione di gravità g . Si comprende allora che, quando sono emessi con forte intensità, gli ultrasuoni possono dare luogo a intense azioni meccaniche e alla produzione di calore nei materiali.

13.4

LIVELLI DI SENSAZIONE SONORA

In base al valore dell'intensità sonora di una conversazione di media intensità ($I = 10^{-6} \text{ W/m}^2$, $d = 1.2 \text{ kg/m}^3$, $v = 340 \text{ m/s}$), utilizzando la (13.6), la variazione di pressione sul timpano risulta essere dell'ordine di $\Delta p_0 = 3 \cdot 10^{-2} \text{ N/m}^2$. Poiché d'altra parte il valore della pressione barometrica è di 10^5 N/m^2 (1 atmosfera), ciò significa che l'orecchio umano, durante una conversazione, riesce a discernere variazioni di pressione di 1 parte su 10 milioni.

Il suono più violento che l'orecchio umano può tollerare è di circa 10 N/m^2 (10^{-4} atmosfere), mentre la soglia di udibilità è di circa 10^{-5} N/m^2 ($\approx 10^{-10}$ atmosfere): in quest'ultimo caso l'orecchio umano riesce a percepire variazioni di pressione di 1 parte su 10 miliardi.

Sotto questo aspetto l'udito umano può essere considerato uno degli organi più sensibili del corpo umano. In effetti la sensibilità dell'orecchio non potrebbe essere maggiore, poiché un aumento di solo un fattore 10 sarebbe sufficiente a fargli percepire il rumore dovuto alla fluttuazione della pressione atmosferica causato dall'agitazione termica delle molecole! Come conseguenza esso percepirebbe un continuo fastidioso brusio (o *rumore di fondo*) che alla

lunga diventerebbe intollerabile. Infatti, chiudendo il padiglione auricolare con una cavità rigida (ad esempio una conchiglia), si avverte un brusio dovuto appunto alla componente della fluttuazione della pressione atmosferica che ha frequenza uguale a quella di risonanza del vano compreso tra l'orecchio e la cavità rigida. Con questo artificio si rende udibile una parte del rumore dovuto all'agitazione termica delle molecole dell'aria.

Dunque l'orecchio è in grado di percepire differenze di pressione sonora dell'ordine di 1 parte su 10^{10} e l'estensione dell'ampiezza della pressione sonora copre 6 ordini di grandezza.

La **sensazione sonora** σ avvertita dall'organo dell'udito è tuttavia ben diversa dal suono definito dal punto di vista strettamente fisico. Essa è caratterizzata da tutte le grandezze fisiche relative alle vibrazioni sonore alcune delle quali, come l'altezza, il timbro e l'intensità, sono legate anche a proprietà fisiologiche soggettive.

In particolare: a) tra l'intensità sonora e la sensazione sonora σ non vi è una relazione lineare; b) a parità di intensità sonora, la corrispondente sensazione σ è diversa a seconda delle caratteristiche del suono originario; e infine c) due intensità diverse vengono percepite come differenti solo se la loro differenza supera un valore minimo fissato, che è proporzionale all'intensità I .

Dalle considerazioni di cui sopra si ottiene il **livello di sensazione sonora** $\sigma - \sigma_0$:

$$\sigma - \sigma_0 = 10 \operatorname{Log} \frac{I}{I_0}, \quad (13.9)$$

dove il fattore 10 è stato introdotto, come vedremo, per comodità di calcolo. Il valore I_0 rappresenta la minima intensità sonora apprezzabile dall'orecchio umano, che è di 10^{-12} W/m^2 . In base alla (13.9) σ_0 è definito come il valore della sensazione sonora σ corrispondente a $I = I_0$.

L'unità di misura della sensazione sonora, espressa dal logaritmo in base 10 del rapporto fra l'intensità sonora I e quella di riferimento I_0 , è chiamata **bel** (B), e, poiché esso costituisce un'unità di misura troppo grande, viene sostituita dal decimo di bel **decibel** (dB):

$$1 \text{ dB} = \frac{1}{10} \text{ B} = \frac{1}{10} \operatorname{Log} \frac{I}{I_0}. \quad (13.10)$$

Il fattore 10 che compare nella (13.9) significa dunque che la sensazione sonora, definita dalla (13.9), viene espressa direttamente in decibel. Nella scala decibel un suono di intensità pari a 10^{-6} W/m^2 corrisponde a 60 dB e il valore della minima sensazione sonora σ_0 è di 0 dB.

La scelta del dB è particolarmente adatta al nostro scopo, poiché il rapporto tra le intensità di due suoni appena percettibili è dell'ordine del dB.

In Tabella 13.1 sono riportate le intensità sonore e le sensazioni sonore di diversi tipi di suoni. Con intensità sonore superiori a 1 W/m^2 (martello pneumatico a 1 metro di distanza) si passa dalla sensazione normale alla sensazione dolorosa. La soglia del dolore è fissata dalla (13.10) in 120 dB e, quindi, l'intervallo di udibilità dell'orecchio umano è compreso tra 0 dB e 120 dB, il che significa 12 ordini di grandezza nell'intensità sonora.

Sensazione sonora

Decibel

TABELLA 13.1 Intensità sonora e sensazione sonora di alcuni rumori tipici

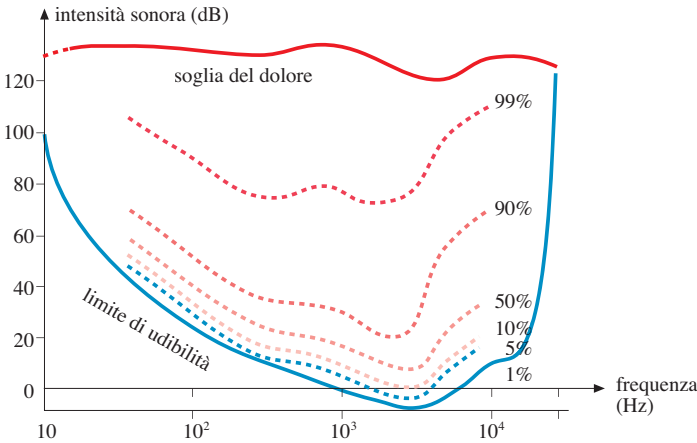
SORGENTI	I (watt m ⁻²)	σ (dB)
studio radio TV	10 ⁻¹⁰	20
mormorio lieve	10 ⁻⁹	30
passi	10 ⁻⁸	40
conversazione media	10 ⁻⁶	60
conversazione a voce alta	10 ⁻⁵	70
strada animata	10 ⁻³	90
automobile su strada	10 ⁻²	100
martello pneumatico (a 1 metro)	1	120
orchestra da 75 elementi	10 ²	140
motore jet	10 ⁴	160

Dal momento che l'intensità I è legata da una legge quadratica con la pressione Δp_o (13.6), l'intervallo di pressione apprezzabile dall'orecchio umano è contenuto entro 6 ordini di grandezza e, confrontando la (13.9) con la (13.5), possiamo caratterizzare i livelli di sensazione sonora anche in termini di pressione:

$$\sigma - \sigma_o = 10 \operatorname{Log} \frac{I}{I_o} \text{ (dB)} = 20 \operatorname{Log} \frac{p}{p_o} \text{ (dB)}, \tag{13.11}$$

dove p_o ha il significato di minima pressione apprezzabile dall'orecchio umano. Consideriamo, infine, la dipendenza della sensazione sonora dalla frequenza delle vibrazioni. La sensibilità dell'orecchio umano varia con la frequenza come indicato nella Figura 13.7, dove le curve di sensazione sonora hanno un minimo compreso fra 3000 Hz e 4000 Hz, in accordo con il fatto che in questo intervallo di frequenze la sensibilità dell'udito è massima. Come già affermato, l'intervallo complessivo di frequenza, cui l'orecchio umano è sensibile, è compreso tra circa 20 Hz e 20 000 Hz. Nel mondo animale tale intervallo può essere notevolmente più esteso, specialmente nelle frequenze ultrasonore.

Figura 13.7
Curve di sensibilità al suono dell'orecchio umano in funzione della frequenza. La curva contrassegnata 1% rappresenta la curva standard per l'udito ottimale, mentre la curva superiore rappresenta la soglia della sensazione dolorosa. Le percentuali sulle altre curve indicano diversi stadi di non sensibilità (sordità).



ESEMPIO 13.4 Sensibilità sonora dell'orecchio

Se un suono di 20 dB ha una frequenza che varia da 20 a 30 000 Hz, quali sono le frequenze che possono essere udite da un orecchio normale?

Soluzione Dalla Figura 13.7 tracciando una linea orizzontale in corrispondenza dei 20 dB, si osserva che essa interseca la curva della soglia di udibilità in corrispondenza dei 200 Hz e dei 14 000 Hz: quindi si potranno udire solo le frequenze comprese in questo intervallo.

13.5 RICEZIONE DI ONDE ELASTICHE NEI SISTEMI BIOLOGICI

L'orecchio è il dispositivo di trasduzione che permette di trasformare le onde sonore in segnali di eccitazione nervosa (potenziali d'azione) che sono poi elaborati dal cervello in modo da fornire le sensazioni sonore. Dal punto di vista funzionale l'orecchio può essere considerato diviso in tre parti: esterno, medio e interno (Figura 13.8).

L'**orecchio esterno** è costituito dal padiglione e dal canale auricolare e ha la funzione di schermare e concentrare la perturbazione sonora verso il timpano.

Orecchio esterno

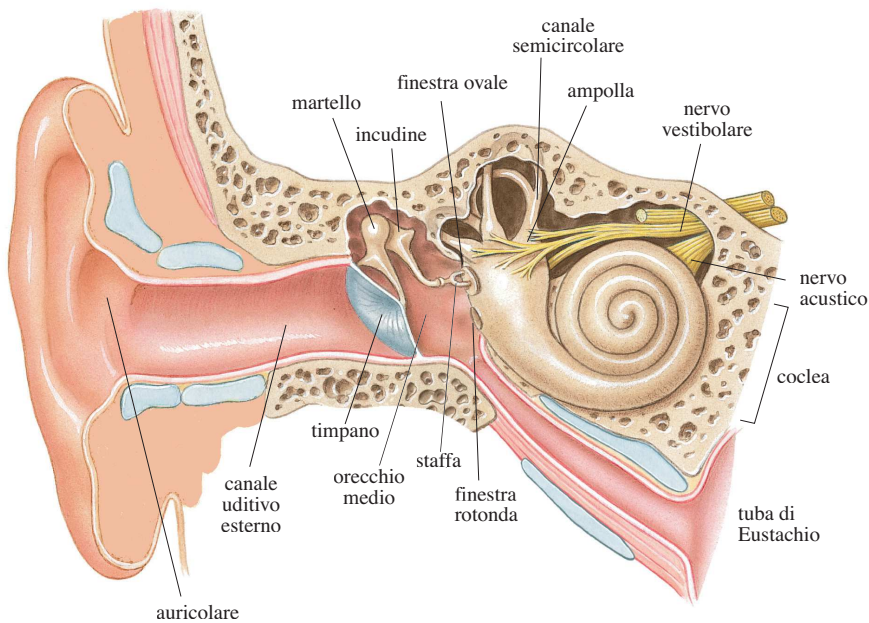


Figura 13.8

Rappresentazione schematica dell'anatomia dell'orecchio umano. Osserva la struttura elicoidale tridimensionale della coclea. In figura sono riportati anche i canali semicircolari.

Il canale auricolare è in pratica un risonatore, essendo schematizzabile come un tubo sonoro chiuso a un'estremità dalla membrana timpanica.

La struttura geometrica dell'orecchio esterno pertanto possiede frequenze di risonanza (come i tubi di un organo) che dipendono soprattutto dalla lunghezza del canale uditivo fino al timpano. Tali frequenze sono intorno a 3400 Hz con una certa variabilità dovuta alle caratteristiche di elasticità dei tessuti e del timpano. Le frequenze di risonanza sono tanto più elevate quanto più sono piccole le lunghezze del canale uditivo.

Nell'**orecchio medio** la funzione dei tre ossicini, martello, incudine e staffa, è quella di trasmettere la vibrazione sonora alla **finestra ovale** amplificandola. La

Orecchio medio

Orecchio interno

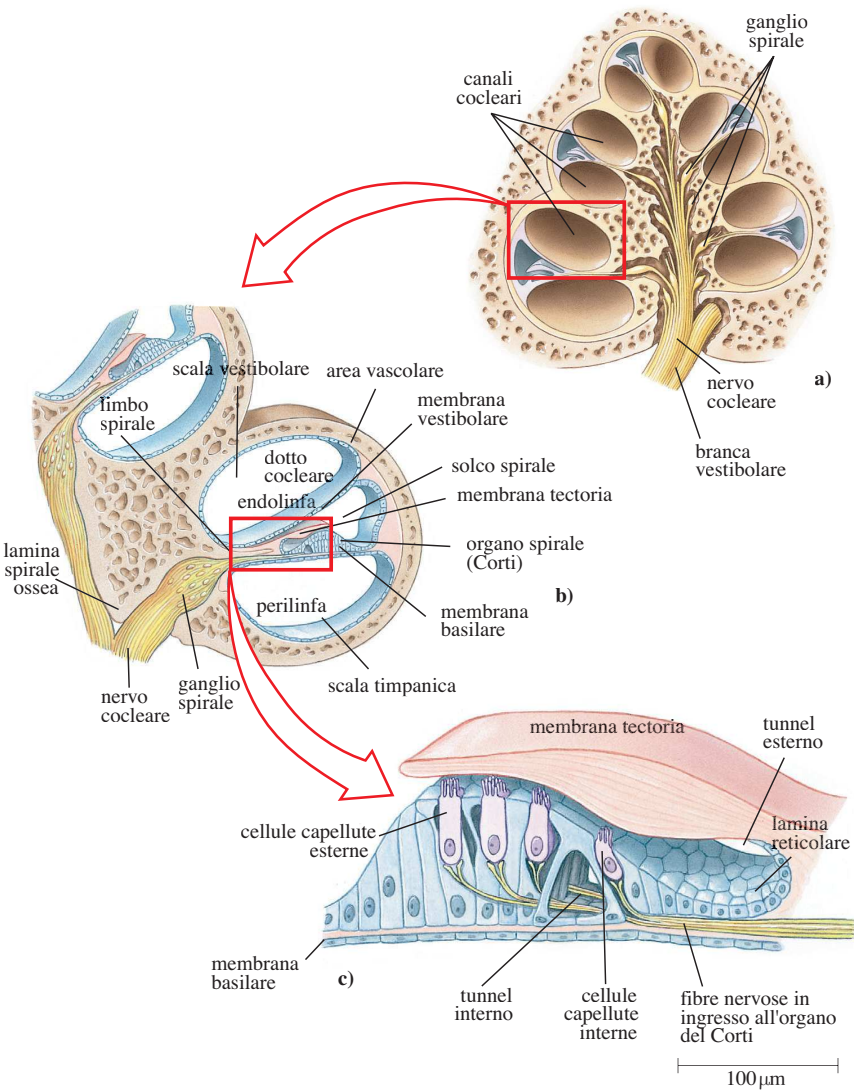
Figura 13.9

Sezione anatomica della coclea umana (a), con successivi ingrandimenti (b) e (c) di sue parti. La scala vestibolare e la scala timpanica sono riempite di perilinfia, mentre il dotto cocleare contiene l'endolinfia. Osserva in (c) la scala delle dimensioni. Le cellule ciliate sono disposte tra le due membrane, basilare e tectoria (c). Esse possono essere eccitate meccanicamente a diverse frequenze a seconda della loro lunghezza. La loro eccitazione, determinata dall'onda acustica che si propaga nella perilinfia e nell'endolinfia, stimola i potenziali d'azione nei prolungamenti delle cellule nervose del nervo acustico.

struttura dei tre ossicini costituisce infatti una leva vantaggiosa del 1° tipo (§5.3) (vedi Figura 13.10).

L'amplificazione è necessaria per poter compensare la perdita di intensità sonora che altrimenti si avrebbe al passaggio dall'aria al liquido nell'orecchio interno. Infatti l'**orecchio interno** (Figure 13.8 e 13.9) è costituito da una struttura canaliforme lunga circa 3.5 cm, avvolta a spirale (**coclea**), che, srotolata, è schematizzata in Figura 13.11. Al suo interno, lungo tutta la sua lunghezza, è disposta una membrana, la **membrana basilare**, di fondamentale importanza per la trasduzione del suono in segnali nervosi. Su di essa è infatti disposto l'**organo del Corti**, che contiene, tra l'altro, le cellule recettrici da cui si originano i prolungamenti che danno luogo alle fibre del nervo acustico.

Questi recettori (**cellule capellute**) si trovano lungo la membrana basilare per tutta la sua lunghezza e possiedono, ciascuno, un lungo ciglio, il cui piegamento stimola le cellule stesse e innesca, alla fine, i potenziali lungo il nervo acustico.



D. Scannicchio • E. Giroletti

Elementi di 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**.

