
Fisica *per* Medicina

con applicazioni fisiologiche,
diagnostiche e terapeutiche

GIANPAOLO BELLINI • ROBERTO CERBINO
GIULIO MANUZIO • FRANCESCO MARZARI
LUCA REPETTO • LUCIO ZENNARO

Fisica *per* Medicina

con applicazioni fisiologiche,
diagnostiche e terapeutiche

PICCIN

Opera coperta dal diritto d'autore – tutti i diritti sono riservati.

Questo testo contiene materiale, testi ed immagini, coperto da copyright e non può essere copiato, riprodotto, distribuito, trasferito, noleggiato, licenziato o trasmesso in pubblico, venduto, prestato a terzi, in tutto o in parte, o utilizzato in alcun altro modo o altrimenti diffuso, se non previa espressa autorizzazione dell'editore. Qualsiasi distribuzione o fruizione non autorizzata del presente testo, così come l'alterazione delle informazioni elettroniche, costituisce una violazione dei diritti dell'editore e dell'autore e sarà sanzionata civilmente e penalmente secondo quanto previsto dalla L. 633/1941 e ss.mm.

ISBN 978-88-299-2958-0

Stampato in Italia

© 2019, Piccin Nuova Libreria S.p.A., Padova
www.piccin.it

Prefazione

La fisica e la chimica sono alla base di tutti processi elementari nei quali si possono scomporre fenomeni complessi riguardanti la biologia e la medicina, nonché dei principi alla base del funzionamento della strumentazione medico-biologica, che è basata su misure sempre di tipo chimico-fisico. È quindi molto importante per un medico essere a conoscenza dei fondamenti della fisica.

Oltre ai concetti di base della fisica, che non sono di pertinenza esclusiva dei medici, vi sono degli sviluppi applicabili direttamente ad aspetti di interesse medico; per fare qualche esempio: in meccanica le proprietà di elasticità e quelle delle leve sono utili per capire il movimento del corpo umano e gli sforzi ai quali sono sottoposti i tendini e le ossa dell'apparato scheletrico, in meccanica dei fluidi lo studio delle membrane elastiche e il moto dei fluidi entro condotte deformabili è utile per capire il funzionamento di tutto il sistema circolatorio, mentre in termodinamica gli sviluppi riguardanti i liquidi hanno la priorità rispetto ai sistemi gassosi. Osservazioni simili valgono per l'elettromagnetismo, alla base dei processi di trasmissione degli impulsi nervosi, e per l'ottica, ove i difetti e la risoluzione delle lenti possono essere compresi e affrontati conoscendo le basi dell'ottica geometrica e dell'ottica fisica. Alcune nozioni di fisica atomica e nucleare sono necessarie per comprendere come funzionano la risonanza magnetica e altri sistemi diagnostici nonché le sorgenti radioattive e i fasci di particelle accelerate nel campo oncologico.

Lo scopo di questo testo è dunque quello di dare allo studente di medicina le nozioni scientifiche necessarie per trarre profitto dai corsi degli anni successivi, come ad esempio gli insegnamenti di fisiologia e biochimica, stabilendo con essi una forte connessione costruita su esempi di interesse biomedico. A tal fine, oltre agli argomenti maggiormente orientati alle Scienze della vita, si inseriscono quelle che chiamiamo Applicazioni che collegano direttamente gli argomenti di fisica con metodi diagnostici (come ad esempio le immagini tomografiche di risonanza magnetica, TAC e PET) e terapeutici, e comunque con caratteristiche del corpo umano.

Una delle difficoltà maggiori che gli studenti di medicina e di altri corsi di laurea di area medico-sanitaria incontrano nell'approcciarsi alla fisica è costituita dalla inevitabile presenza di equazioni e formule matematiche e statistiche. In questo testo abbiamo cercato di trattare gli argomenti proposti in modo semplice e, laddove possibile, fornendo approcci semplificati. Per aiutare maggiormente lo studente abbiamo inserito all'inizio del libro dei richiami di matematica (Capitolo C). In modo simile, sono forniti dei brevi richiami ai concetti di misura e di incertezza della stessa (Capitolo TE), molto importanti nelle analisi mediche ma solitamente trattati in un corso apposito.

Indice generale

Prefazione	V	TE5 Misura di una grandezza ed errore di osservazione	40
SI Alcune nozioni sui sistemi di unità di misura	1	TE6 Errori casuali e loro trattazione	43
Appendice A Alcune costanti fisiche	8	TE7 Propagazione degli errori	43
Appendice B Tavola di Mendeleev	9	TE8 Combinazione di campioni ottenuti con misure diverse	44
C Alcuni cenni di calcolo matematico	11	M Meccanica	47
C1 Funzioni e diagrammi	11	M0 Introduzione	47
C1.1 Introduzione	11	M1 Forze e momenti. Moto ed equilibrio	47
C1.2 Diagramma di una funzione e sua rappresentazione grafica	12	M1.1 Le ipotesi e gli strumenti	47
C1.3 Rappresentazione grafica di alcune funzioni comuni	13	M1.1.1 Corpo esteso e centro di massa	47
C2 Logaritmi	15	M1.1.2 Corpo deformabile, corpo rigido e ipotesi di punto materiale	49
C2.1 Alcune proprietà dei logaritmi	16	M1.1.3 Forze, forze fondamentali e derivate, forze attive e passive	50
C2.2 La scala logaritmica	16	M1.2 Misurare il moto	50
C3 Cenni sui vettori	17	M1.2.1 Legge oraria del moto, vettore posizione, vettore velocità media	50
C3.1 Operazioni sui vettori	18	M1.2.2 Vettore velocità istantanea, traiettoria, ascissa curvilinea	52
C4 Alcuni cenni di trigonometria	22	M1.2.3 Vettore accelerazione media e istantanea	54
C4.1 Le variabili angolari	22	M1.2.4 Accelerazione tangenziale e normale	55
C4.2 Le funzioni circolari o trigonometriche	23	M1.3 Moti semplici	57
C4.3 Alcune proprietà delle funzioni trigonometriche	24	M1.3.1 Moto rettilineo uniforme	57
C4.4 Rappresentazione grafica delle funzioni circolari o trigonometriche	25	M1.3.2 Moto rettilineo uniformemente accelerato (caduta libera)	58
C4.5 L'angolo solido	26	M1.3.3 Il moto parabolico	60
C5 Alcuni simboli matematici utilizzati in fisica	27	M1.3.4 Moto circolare	62
C6 Limite di una funzione	27	M1.3.5 Moto armonico semplice	64
C7 Derivata di una funzione	29	M1.4 Leggi di Newton e forze	65
C8 Funzione di più variabili	30	M1.4.1 La prima legge di Newton	65
C9 Derivata parziale	31	M1.4.2 La seconda legge di Newton	66
C10 L'integrale	31	M1.4.3 La terza legge di Newton o principio di azione e reazione	67
TE Alcune nozioni di teoria degli errori	35	M1.4.4 Equilibrio traslazionale	67
TE1 Introduzione	35	M1.4.5 La forza gravitazionale e la forza peso	68
TE2 Distribuzioni di frequenza	36	M1.4.6 La forza normale (o perpendicolare)	69
TE3 Elementi caratteristici di una distribuzione di frequenza	37		
TE4 Richiami sulla distribuzione normale o di Gauss delle frequenze	38		

M1.4.7	Forza di attrito tra due corpi solidi. . .	70	F1	Statica dei fluidi	116
M1.4.8	Forza di attrito viscoso.	73	F1.1	Isotropia delle pressioni.	116
M1.4.9	Forza muscolare.	75	F1.1.1	Martinetto idraulico	117
M1.4.10	Forza centripeta, forza centrifuga, forze apparenti, sistemi di riferimento inerziali	76	F1.2	Variazione della pressione con l'altezza.	118
M1.5	Elasticità di un solido.	76	F1.2.1	Pressione idrostatica: legge di Stevin	118
M1.5.1	Trazione, compressione e taglio: sforzi e deformazioni.	76	F1.3	Unità di misura della pressione	121
M1.5.2	Curva sforzo-deformazione per un materiale. Elasticità e plasticità . .	77	Applicazione F.1	Embolia gassosa	122
M1.5.3	Moduli elastici	78	Applicazione F.2	Pressione ortostatica	123
M1.5.4	Il punto di rottura: materiali duttili e materiali fragili.	78	Applicazione F.3	Accelerazione e pressione sanguigna.	123
M1.5.5	Curva sforzo-deformazione per un osso	79	Applicazione F.4	Mal di montagna: riduzione con l'altitudine del metabolismo dell'ossigeno.	124
M1.5.6	Legge di Hooke	80	F1.4	La spinta di Archimede	126
M1.6	Rotazione di un corpo rigido esteso. .	81	F2	Dinamica dei fluidi	127
M1.6.1	Momento di una forza	81	F2.1	Portata ed equazione di continuità. .	127
M1.6.2	Momento di inerzia	82	F2.2	Liquidi non viscosi e teorema di Bernoulli	129
M1.6.3	Equilibrio rotazionale	84	Applicazione F.5	Aneurisma e stenosi.	130
M1.7	Esempi di statica del corpo umano . .	86	Applicazione F.6	Attacco ischemico transitorio	131
M1.7.1	Equilibrio e stabilità dell'uomo. . . .	86	F2.3	Liquidi viscosi	132
M1.7.2	Leve	87	F2.4	Moto di un fluido in regime di Poiseuille	134
M1.7.3	Leve del corpo umano	89	F2.5	Regime macrovorticoso o idraulico	138
Applicazione M.1	Il principio di azione e reazione è alla base della locomozione umana	92	F2.6	Fluidi non newtoniani	139
Applicazione M.2	Dimensione delle vertebre.	92	Applicazione F.7	La circolazione del sangue	140
Applicazione M.3	Forze alle quali è sottoposta la spina dorsale.	93	F2.7	Legge di Stokes	141
Applicazione M.4	Forze alle quali è sottoposto il femore durante la deambulazione	96	Applicazione F.8	Velocità di sedimentazione, centrifuga e ultracentrifuga	142
M2	Lavoro, energia, potenza	98	Applicazione F.9	Elettroforesi	144
M2.1	Lavoro ed energia cinetica.	99	Esercizi di meccanica dei fluidi	146	
M2.1.1	Lavoro di una forza costante	99	Soluzioni degli esercizi di meccanica dei fluidi	150	
M2.1.2	Lavoro di una forza arbitraria	100	T	Termodinamica	161
M2.1.3	Energia cinetica e teorema dell'energia cinetica.	102	T1	La temperatura.	161
M2.2	Energia potenziale, forze conservative e forze dissipative	103	T1.1	Sistema e grandezze termodinamiche. Pressione e volume	161
M2.2.1	Energia potenziale	103	T1.2	La temperatura.	162
M2.3	Energia meccanica e condizioni per la sua conservazione	104	T1.3	Contatto termico	163
M2.4	Lavoro ed energia per il moto rotazionale attorno ad un asse fisso .	105	T1.4	Sostanze isolanti	164
M2.5	Potenza.	105	T1.5	Temperatura ed equazione di stato. .	164
M2.6	Urti.	105	T1.6	Definizione della temperatura mediante la teoria cinetica dei gas.	167
Esercizi di meccanica	107	T1.7	La legge di Dalton	169	
Soluzioni degli esercizi di meccanica.	109	T2	Il calore	170	
F	Meccanica dei fluidi	115	T2.1	Il concetto intuitivo di calore.	170
F0	Introduzione.	115	T2.2	Il calore specifico e molare	170
F0.1	I fluidi.	115	T2.3	Scambi di calore	172
			T2.4	Equivalente meccanico della caloria	174
			T3	Energia interna e primo principio	175
			T3.1	L'energia interna	175
			T3.2	Come varia l'energia interna di un corpo.	176

T3.3	Primo principio della termodinamica	178	E4.3	Il principio di sovrapposizione e il calcolo dei campi elettrici in generale	237
T3.4	Il significato microscopico dell'energia interna dei gas	181	E4.4	Il concetto di campo modifica il concetto di vuoto	239
T3.5	Trasformazioni di energia interna nelle reazioni chimiche	182	E5	Un dispositivo che produce in modo semplice campi elettrici uniformi: il condensatore piano	239
T3.6	Il passaggio di calore tra corpi	183	E6	I dipoli elettrici	240
	Applicazione T.1 La misura del metabolismo basale	186	E7	Il campo magnetico	243
	Applicazione T.2 Valutazione del calore perduto con la respirazione	187	E7.1	La forza di Lorentz	244
T4	Il secondo principio della termodinamica	187	E7.2	La corrente elettrica: una prima nozione	245
T4.1	La freccia del tempo	187	E7.3	La seconda equazione di Maxwell. La legge di Gauss magnetica	246
T4.2	Il secondo principio della termodinamica	188	E7.4	Unità di misura: il Tesla e il Weber	246
T4.3	La termodinamica delle soluzioni	189	E7.5	La legge di Ampere	247
T4.3.1	La diffusione libera	189	E7.5.1	Flusso concatenato con una linea aperta	247
T4.3.2	Osmosi e pressione osmotica	191	E7.5.2	La descrizione dei vortici: la circuitazione	248
T4.3.3	Il potenziale chimico	195	E7.5.3	La legge di Ampere. La circuitazione dei campi magnetici in situazioni statiche	249
T4.3.4	Gli equilibri termodinamici	196	E8	Sorgenti tipiche di campo magnetico	249
T4.4	L'entropia	201	E8.1	La legge di Biot Savart: il campo magnetico prodotto da fili rettilinei percorsi da corrente	249
T4.4.1	Trasformazioni reversibili e irreversibili	201	E8.2	I solenoidi	250
T4.4.2	Calore e lavoro	202	E8.3	Spire percorse da corrente	252
T4.4.3	La funzione di stato entropia	204	E9	I momenti magnetici	253
T4.4.4	Entropia e disordine	207	E9.1	I momenti magnetici e la loro energia di posizione	253
T4.4.5	La funzione Entalpia	208	E9.2	Dipoli magnetici atomici	254
T4.4.6	L'energia libera	209	E9.3	I dipoli magnetici nucleari	255
T5	I fenomeni di trasporto attraverso le membrane	212	E10	Terza e quarta equazione di Maxwell	255
T5.1	Introduzione	212	E10.1	La terza equazione di Maxwell: la circuitazione dei campi elettrici e la legge di Faraday-Neumann-Lenz	255
	Applicazione T.3 Diffusione di molecole liposolubili attraverso le membrane	214	E10.2	L'induzione elettromagnetica	256
	Applicazione T.4 Diffusione di molecole idrosolubili (non cariche) attraverso le membrane	216	E10.3	La quarta equazione di Maxwell in forma completa: la legge di Ampere-Maxwell	257
	Applicazione T.5 Diffusione libera e sistema circolatorio	217	E11	Onde elettromagnetiche	257
	Applicazione T.6 Permeabilità delle membrane	218	E11.1	La velocità della luce	258
	Applicazione T.7 Il passaggio di solventi attraverso le membrane	220	E11.2	Studio dell'origine di un'onda elettromagnetica. Le antenne	259
	Applicazione T.8 La diffusione di molecole idrosolubili cariche e l'origine del potenziale di membrana	221	E12	Circuiti elettrici	261
	Esercizi di termodinamica	225	E12.1	La corrente elettrica in generale	261
	Soluzioni degli esercizi di termodinamica	229	E12.2	Il circuito elettrico base	262
E	Elettromagnetismo	231	E13	La misura delle energie potenziali di una carica elettrica	264
E1	Introduzione	231	E13.1	Il concetto di differenza di potenziale	264
E2	La carica elettrica	232			
E3	La legge di Coulomb	233			
E4	Il campo elettrico	234			
E4.1	Isolanti, conduttori e la costante dielettrica	235			
E4.2	Il teorema di Gauss	235			

E13.2	Elementi di utilizzazione molto particolari: le resistenze	265	O2.5	Effetto Doppler	311
E13.3	Resistenze in serie e in parallelo	266	O3	Optica	312
E13.4	Il concetto di forza elettromotrice	266	O3.1	Le onde elettromagnetiche	312
E14	Circuiti in corrente continua e in corrente variabile	268	O3.2	L'intensità luminosa	314
E14.1	Indicazioni generali	268	O3.3	La propagazione della luce e la trasformazione dei fronti d'onda	315
E14.2	Elementi passivi di circuito in regime di corrente variabile. Resistenze condensatori e induttanze	269	O3.3.1	Riflessione e rifrazione della luce	315
E14.3	Carica e scarica dei condensatori	272	O3.3.2	Il fenomeno della dispersione	317
Applicazione E.1	Lo spettrometro di massa	274	O3.3.3	Attenuazione della luce e densità ottica	318
Applicazione E.2	La trasmissione di segnali lungo gli assoni del sistema nervoso	276	O3.3.4	L'interferenza e la coerenza	319
Applicazione E.3	La codificazione delle informazioni nervose	279	O3.3.5	La propagazione dei fronti d'onda e la diffrazione	321
Applicazione E.4	I principi fisici della elettrocardiografia, elettroencefalografia ed elettromiografia	281	O3.4	La formazione dell'immagine	323
Esercizi di elettromagnetismo		284	O3.4.1	I "sensori" di immagine	324
Soluzioni degli esercizi di elettromagnetismo		286	O3.4.2	L'approssimazione dell'ottica geometrica	324
O1	Generalità sulle onde	289	O3.4.3	Il diottero sferico	325
O1.1	Introduzione	289	O3.4.4	La lente sottile	327
O1.2	L'onda trasporta energia ma non materia	289	O3.4.5	La costruzione dell'immagine mediante il tracciamento dei raggi	328
O1.3	Le caratteristiche delle onde	290	O3.4.6	Il limite di risoluzione	329
O1.4	Fronti d'onda e sorgenti	291	O3.4.7	Sistemi composti da più lenti	331
O1.4.1	Fronti d'onda sferici	291	O3.4.8	Le aberrazioni	332
O1.4.2	Fronti d'onda piani	292	Applicazione O.4	Apparato visivo	333
O1.5	La propagazione dei fronti d'onda nello spazio	292	Applicazione O.4.1	L'acuità visiva	335
O1.5.1	Riflessione e rifrazione	293	Applicazione O.4.2	Ametropie e loro correzione mediante lenti oftalmiche	337
O1.5.2	Diffrazione	294	Applicazione O.4.3	Il processo elettrochimico della visione	338
O1.5.3	Assorbimento	294	Applicazione O.5	Strumentazione ottica in medicina	339
O1.6	Onde periodiche	294	Applicazione O.5.1	Il microscopio ottico	339
O1.6.1	Onde sinusoidali	295	Applicazione O.5.2	Il laser	341
O1.6.2	Teorema di Fourier	297	Applicazione O.5.3	Le fibre ottiche	343
O1.6.3	Elementi risonanti e onde stazionarie	298	Esercizi sulle onde		344
O2	Acustica	299	Soluzioni degli esercizi sulle onde		347
O2.1	Le onde sonore	299	FAR	Fisica atomica e delle radiazioni	351
O2.1.1	Velocità del suono nei gas perfetti	300	FAR1	Introduzione	351
O2.2	Intensità sonora e impedenza acustica	302	FAR2	La quantizzazione	351
O2.2.1	Le discontinuità nell'impedenza	302	FAR3	Spettri di emissione e di assorbimento	353
Applicazione O.1	Apparato fonatorio	303	FAR4	La struttura dell'atomo	354
Applicazione O.2	Apparato uditivo	305	FAR5	I livelli energetici dell'atomo di idrogeno	356
Applicazione O.2.1	La trasduzione delle onde di pressione	307	FAR6	Un passaggio alla Meccanica Quantistica	358
O2.3	Sensazione sonora	307	FAR7	Il modello dell'atomo alla luce della Meccanica Quantistica	360
O2.4	Regioni nello spettro delle onde acustiche	308	FAR7.1	Gli orbitali molecolari	363
Applicazione O.3	Ecografia	309	FAR7.2	Cenni agli effetti della quantizzazione nella fisica nucleare e subnucleare	364
			FAR8	Gli atomi e l'assorbimento di energia: eccitazione e ionizzazione	366
			FAR8.1	Il concetto di sezione d'urto	367
			FAR8.2	Il fenomeno della ionizzazione	369

FAR9	Le interazioni con la materia dei fotoni a bassa energia.	371	FAR14	Radiazioni e organismi biologici.	421
FAR9.1	La spettroscopia di assorbimento UV-Visibile.	374	FAR15	Cenni di radioprotezione.	423
FAR9.2	La spettroscopia di emissione UV-Visibile.	378	FAR16	Alcuni cenni su come si misurano le radiazioni.	424
FAR9.3	La spettroscopia Infrarossa (I.R.).	383	Applicazione FAR.2	Dall'interazione energia-materia alle immagini diagnostiche.	425
FAR9.4	La spettroscopia di Risonanza Magnetica Nucleare (R.M.N.) . . .	390	Applicazione FAR.3	Le tecniche tomografiche.	426
FAR9.4.1	NMR: le basi teoriche	391	Applicazione FAR.4	Le immagini di Risonanza Magnetica (MRI)	429
FAR9.4.2	NMR: le condizioni di risonanza .	396	Applicazione FAR.4.1	MRI: selezione di fetta	433
FAR9.4.3	NMR: il segnale (FID).	399	Applicazione FAR.4.2	MRI: codifica (selezione) di fase.	434
FAR9.4.4	NMR: NMR: i tempi di rilassamento T_1 e T_2	402	Applicazione FAR.4.3	MRI: selezione del voxel (codifica di frequenza)	435
FAR9.4.5	NMR: lo spostamento chimico δ (Chemical shift)	407	Applicazione FAR.4.4	Il contrasto delle immagini MRI: pesatura in T_1 e in T_2 . .	436
FAR9.4.6	NMR: la costante di accoppiamento iperfine J	408	Applicazione FAR.4.5	Gli agenti di contrasto in MRI	437
FAR10	Le interazioni con la materia dei fotoni a bassa energia	409	Applicazione FAR.5	La tomografia computerizzata ai raggi X (TC)	438
FAR10.1	I tubi a raggi X (Tubi Radiogeni) e il fenomeno della Bremsstrahlung	410	Applicazione FAR.5.1	TC: evoluzione delle geometrie tomografiche.	443
FAR10.2	Utilizzo dei raggi X	411	Applicazione FAR.6	La tomografia a emissione di positroni (PET)	446
FAR11	Acceleratori di particelle	414			
FAR11.1	Elettroni	414			
Applicazione FAR.1	Adroni e adroterapia.	416			
FAR12	Cenni alla struttura dei nuclei e ai decadimenti radioattivi	418			
FAR13	Il Becquerel e la vita media dei nuclei radioattivi	420	Indice analitico.		449

Indice delle Applicazioni

Applicazione M.1		
Il principio di azione e reazione è alla base della locomozione umana	92	
Applicazione M.2		
Dimensione delle vertebre	92	
Applicazione M.3		
Forze alle quali è sottoposta la spina dorsale	93	
Applicazione M.4		
Forze alle quali è sottoposto il femore durante la deambulazione	96	
Applicazione F.1		
Embolia gassosa	122	
Applicazione F.2		
Pressione ortostatica	123	
Applicazione F.3		
Accelerazione e pressione sanguigna	123	
Applicazione F.4		
Mal di montagna: riduzione con l'altitudine del metabolismo dell'ossigeno	124	
Applicazione F.5		
Aneurisma e stenosi	130	
Applicazione F.6		
Attacco ischemico transitorio	131	
Applicazione F.7		
La circolazione del sangue	140	
Applicazione F.8		
Velocità di sedimentazione, centrifuga e ultracentrifuga	142	
Applicazione F.9		
Elettroforesi	144	
Applicazione T.1		
La misura del metabolismo basale	186	
Applicazione T.2		
Valutazione del calore perduto con la respirazione.	187	
Applicazione T.3		
Diffusione di molecole liposolubili attraverso membrane	214	
Applicazione T.4		
Diffusione di molecole idrosolubili (non cariche) attraverso membrane	216	
Applicazione T.5		
Diffusione libera e sistema circolatorio	217	
Applicazione T.6		
Permeabilità delle membrane	218	
Applicazione T.7		
Il passaggio di solventi attraverso le membrane	220	
Applicazione T.8		
La diffusione di molecole idrosolubili cariche e l'origine del potenziale di membrana	221	
Applicazione E.1		
Lo spettrometro di massa	274	
Applicazione E.2		
La trasmissione di segnali lungo gli assoni del sistema nervoso	276	
Applicazione E.3		
La codificazione delle informazioni nervose	279	
Applicazione E.4		
I principi fisici della elettrocardiografia, elettroencefalografia ed elettromiografia	281	
Applicazione O.1		
Apparato fonatorio	303	
Applicazione O.2		
Apparato uditivo	305	
Applicazione O.2.1		
La trasduzione delle onde di pressione	307	
Applicazione O.3		
Ecografia	309	
Applicazione O.4		
Apparato visivo	333	
Applicazione O.4.1		
L'acuità visiva	335	
Applicazione O.4.2		
Ametropie e loro correzione mediante lenti oftalmiche	337	

Applicazione O.4.3		Applicazione FAR.4.1	
Il processo elettrochimico della visione	338	MRI: selezione di fetta	433
Applicazione O.5		Applicazione FAR.4.2	
Strumentazione ottica in medicina	339	MRI: codifica (selezione) di fase	434
Applicazione O.5.1		Applicazione FAR.4.3	
Il microscopio ottico	339	MRI: selezione del voxel (codifica di frequenza)	435
Applicazione O.5.2		Applicazione FAR.4.4	
Il laser	341	Il contrasto delle immagini MRI: pesatura in T_1 e in T_2	436
Applicazione O.5.3		Applicazione FAR.4.5	
Le fibre ottiche	343	Gli agenti di contrasto in MRI	437
Applicazione FAR.1		Applicazione FAR.5	
Adroni e adroterapia	416	La tomografia computerizzata ai raggi X (TC)	438
Applicazione FAR.2		Applicazione FAR.5.1	
Dall'interazione energia-materia alle immagini diagnostiche	425	TC: evoluzione delle geometrie tomografiche	443
Applicazione FAR.3		Applicazione FAR.6	
Le tecniche tomografiche	426	La tomografia a emissione di positroni (PET)	446
Applicazione FAR.4			
Le immagini di Risonanza Magnetica (MRI)	429		

Autori

Gianpaolo Bellini

Professore Emerito
Dipartimento di Fisica
Università degli Studi di Milano

Roberto Cerbino

Professore Associato
Dipartimento di Biotecnologie Mediche
e Medicina Traslazionale
Università degli Studi di Milano

Giulio Manuzio

Già Professore Ordinario
Facoltà di Medicina e Chirurgia
Università degli Studi di Genova

Francesco Marzari

Professore Associato
Dipartimento di Fisica e Astronomia
Università degli Studi di Padova

Luca Repetto

Ricercatore
Dipartimento di Fisica
Università degli Studi di Genova

Lucio Zennaro

Professore Aggregato
Dipartimento di Medicina Molecolare
Università degli Studi di Padova

