

Maurizio Zani

Raccolta di lezioni per

Elettromagnetismo

Elettricità. Corrente. Magnetismo

II edizione

*“Who wants to live
forever...”*

Queen

Prefazione

Questo testo è una raccolta delle lezioni svolte in aula dal sottoscritto in questi anni durante i corsi di Fisica Sperimentale a Ingegneria presso il Politecnico di Milano. Il testo è organizzato con una sequenza che bene o male segue quella tenuta in aula.

Lungi da me pensare che il testo sia esaustivo, e che consenta di evitare di frequentare le lezioni in aula; è invece uno strumento complementare, che può aiutare a seguire più agevolmente le tematiche proposte, con il supporto di avere sott'occhio i procedimenti seguiti in aula.

Consigli: nel testo sono contenuti degli esercizi d'esempio per le diverse tematiche, evidenziati con un segno a lato come il seguente

| Esercizio d'esempio

E' comunque importante che di ogni tematica trattata si capisca l'ambito di validità, così da poterla applicare ai vari casi che si presentano e non fermandosi ai soli esempi presentati.

Ogni termine o definizione importante compare in **grassetto** nel testo, e viene poi riportato per comodità nell'indice degli argomenti a fondo libro; è presente anche un indice degli autori richiamati nel testo, un indice delle costanti e un indice delle unità di misura.

Errori: ne è piena la Terra, figurarsi qui dentro!! Che dire, vi sarei grato, e con me gli studenti futuri, se voleste segnalarmeli, così che questo strumento possa essere continuamente migliorato nelle successive edizioni (maurizio.zani@polimi.it)

Ringraziamenti: mi fa piacere cominciare a ringraziare proprio gli studenti, dai quali molte volte ho preso ispirazione per cercare nuovi esempi che chiarissero la tematica, per continuare con i colleghi con i quali ho condiviso il compito di docente e dai quali ho appreso utili consigli per il compito dell'insegnamento.

Ora basta essere così seri (chi ha seguito le mie lezioni sa a cosa mi riferisco):  prendete carta, penna e calamaio e... buon lavoro!

Maurizio Zani

Ottobre, 2015

Sommario

Elettrostatica	11
Elettrizzazione	11
Strofinio.....	12
Contatto.....	13
Induzione elettrostatica	14
Polarizzazione.....	15
Forza elettrica	16
Carica elettrica.....	16
Struttura della materia	19
Forza di Coulomb.....	23
Carica esploratrice.....	27
Campo elettrico	28
Campo elettrico.....	28
Linee di flusso	34
Tubo di flusso.....	35
Moto di cariche.....	36
Teorema di Gauss	37
Flusso.....	37
Superficie sferica	39
Superficie generica	41
Campo conservativo.....	46
Energia potenziale elettrica.....	46
Potenziale elettrico	49
Energia elettrica	51
Dipolo elettrico	57
Interazioni create.....	57
Interazioni subite.....	59
Sviluppo in multipoli.....	61
Formulazione differenziale	66
Condizioni al contorno	66
Leggi di Maxwell	69
Energia elettrica	73
Equazione di Poisson.....	75
 Materiali conduttori	 77
Conduttore pieno.....	77
Conduttore carico.....	77
Teorema di Coulomb	79
Pressione elettrostatica	80
Conduttore in campo esterno	82
Conduttori a contatto.....	83
Conduttore cavo	85
Conduttore carico.....	85
Carica nella cavità	86
Conduttore in campo esterno	87
Capacità elettrica.....	88
Energia elettrica	89
 Condensatori	 91
Capacità	91
Condensatore piano.....	92
Condensatore cilindrico	95

<i>Condensatore sferico</i>	97
Energia elettrica	98
Serie e parallelo	100
<i>Condensatori in serie</i>	100
<i>Condensatori in parallelo</i>	100
Mutua capacità	101
Materiali dielettrici	103
Materiali dielettrici	103
<i>Condensatore piano</i>	103
<i>Lastra conduttrice</i>	104
<i>Lastra dielettrica</i>	105
Polarizzazione	108
<i>Polarizzazione (fenomeno)</i>	108
<i>Polarizzazione (vettore)</i>	111
<i>Induzione elettrica</i>	112
Formulazione differenziale	114
<i>Polarizzazione</i>	114
<i>Induzione elettrica</i>	115
<i>Equazioni di Maxwell</i>	117
Condensatori	118
<i>Condensatori in serie</i>	118
<i>Condensatori in parallelo</i>	120
<i>Richiamo del dielettrico</i>	122
Corrente elettrica	125
Corrente	125
Densità di corrente	127
Conservazione della carica	130
<i>Equazione di continuità</i>	130
<i>Fenomeni stazionari</i>	131
<i>Fenomeni non stazionari</i>	132
Resistori	133
Resistenza elettrica	133
<i>Prima legge di Ohm</i>	133
<i>Seconda legge di Ohm</i>	134
<i>Legge di Ohm infinitesima</i>	136
<i>Codice colori</i>	137
Modello di Drude	138
<i>Modello di Drude</i>	138
<i>Velocità termica</i>	139
<i>Velocità di deriva</i>	140
Legge di Joule	142
Serie e parallelo	144
<i>Resistori in serie</i>	144
<i>Resistori in parallelo</i>	144
Superconduttori	145
<i>Classificazione</i>	145
Circuiti elettrici continui	147
Generatori	147
<i>Generatore ideale</i>	147
<i>Generatore reale</i>	150
<i>Tipi di generatore</i>	152

Leggi di Kirchhoff	153
Prima legge di Kirchhoff.....	153
Seconda legge di Kirchhoff.....	154
Strumenti di misura.....	155
Amperometro	155
Voltmetro.....	155
Multimetro.....	155
Magnetostatica	157
Magnetizzazione	157
Magnetizzazione.....	157
Forza magnetica	158
Linee di flusso	160
Campo magnetico	161
Forza magnetica.....	162
Forza di Lorentz.....	162
Moto di cariche.....	164
Effetto Hall.....	168
Seconda legge elementare di Laplace	169
Campo magnetico	171
Campo magnetico	171
Prima legge elementare di Laplace.....	173
Forza tra correnti	175
Teorema di Gauss	176
Teorema di Ampère	177
Linea circolare.....	177
Linea generica	178
Dipolo magnetico.....	185
Dipolo magnetico.....	185
Spira circolare	187
Spira rettangolare.....	189
Teorema di equivalenza di Ampère	191
Magnetone di Bohr	192
Formulazione differenziale	193
Condizioni al contorno	193
Leggi di Maxwell	196
Induzione elettromagnetica.....	199
Legge di Faraday-Henry	199
Legge di Lenz	201
Induzione di movimento.....	202
Induzione di trasformazione	203
Correnti di Foucault	204
Induttori	205
Induttanza.....	205
Solenoido.....	206
Energia magnetica.....	210
Serie e parallelo.....	212
Induttori in serie	212
Induttori in parallelo	212
Mutua induttanza	213
Materiali magnetici.....	215
Materiali magnetici	215

<i>Solenoido</i>	215
<i>Cilindro magnetico</i>	216
Magnetizzazione	217
<i>Magnetizzazione (fenomeno)</i>	217
<i>Magnetizzazione (vettore)</i>	220
<i>Induzione magnetica</i>	221
Formulazione differenziale	222
<i>Magnetizzazione</i>	222
<i>Induzione magnetica</i>	223
<i>Equazioni di Maxwell</i>	225
Circuiti elettrici variabili	227
Circuiti in transitorio	227
<i>Carica e scarica del condensatore</i>	227
<i>Carica e scarica dell'induttore</i>	233
Circuiti oscillanti.....	237
<i>Oscillatore ideale</i>	237
<i>Oscillatore reale smorzato</i>	238
<i>Oscillatore reale forzato</i>	239
Elettromagnetismo	243
Relatività	243
<i>Fisica classica</i>	244
<i>Fisica relativistica</i>	245
Equazioni di Maxwell	247
<i>Induzione magnetoelettrica</i>	248
<i>Equazioni di Maxwell</i>	250
<i>Condizioni al contorno</i>	251
<i>Formulazione differenziale</i>	252
Onde elettromagnetiche	254
Bibliografia	257
Indice	259
Indice degli autori	259
Indice delle costanti	260
Indice delle unità di misura.....	261
Indice degli argomenti	262

Bibliografia

- S. Bobbio, E. Gatti**, *Elettromagnetismo - Ottica*, Ed. Boringhieri (1991)
- R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands**, *La fisica di Feynman - vol. 2*, Ed. Zanichelli (2001)
- P. Fleury, J. P. Mathieu**, *Trattato di fisica generale e sperimentale - vol. 6*, Ed. Zanichelli (1970)
- S. Focardi, I. Massa, A. Uguzzoni**, *Fisica Generale - Elettromagnetismo*, Casa Editrice Ambrosiana (2003)
- D. C. Giancoli**, *Fisica 2*, Casa Editrice Ambrosiana (2010)
- E. Hecht**, *Fisica 2 - Elettricità, Magnetismo, Ottica, Fisica moderna*, Ed. Zanichelli (1999)
- J. D. Jackson**, *Elettrodinamica classica*, Ed. Zanichelli (1999)
- L. Lovitch, S. Rosati**, *Fisica generale - Elettricità e magnetismo*, Casa Editrice Ambrosiana (1979)
- P. Mazzoldi, M. Nigro, C. Voci**, *Fisica II - Elettromagnetismo, Onde*, EdiSES (1994)
- C. Mencuccini, V. Silvestrini**, *Fisica II - Elettromagnetismo, Ottica*, EdiSES (1998)
- E. Pappin**, *Fisica - Meccanica, Termodinamica, Elettromagnetismo*, Ed. Maggioli (2004)
- D. Halliday, R. Resnick, K. S. Krane**, *Fisica 2*, Casa Editrice Ambrosiana (2004)
- G. Tonzig**, *Elementi di Fisica Generale*, Ed. Utet (1999)

Indice

Indice degli autori

Ampère, André Marie	125; 161; 179; 191
Ångström, Anders Jonas	26
Barlow, Peter	132
Bich, Marcel	11
Biot, Jean-Baptiste	161
Bíró, László József	11
Bohr, Niels	19; 192
Boltzmann, Ludwig	142
Cavendish, Henry	23
Coulomb, Charles Augustin de	23; 158
Dirac, Paul Adrien Maurice	176
Drude, Paul Karl Ludwig	138
du Fay, Charles F. de Cisternay	12
Earnshaw, Samuel	76
Faraday, Michael	34; 87; 88; 105; 199
Felici, Riccardo	200
Foucault, Jean Bernard Léon	204
Franklin, Benjamin	16; 84; 85; 125; 128
Galvani, Luigi	152
Gauss, Carl Friedrich	39
Gilbert, William	12; 157
Giorgi, Giovanni	16
Gray, Stephen	12
Hall, David	176
Hall, Edwin Herbert	168
Hauskbee, Francis	18
Heaviside, Oliver	165
Henry, Joseph	199; 205; 235
Joule, James Prescott	142
Kirchhoff, Gustav Robert	153
Lenz, Heinrich Friedrich Emil	201
Lorentz, Hendrik Antoon	162
Maxwell, James Clerk	248; 255
Michell, John	158
Musschenbroeck, Pieter van	96
Neumann, Franz Ernst	202
Oersted, Hans Christian	161
Ohm, Georg Simon	133
Rutherford, Ernest	19
Savart, Félix	161
Siemens, Werner von	133
Stefan, Jožef	142
Tesla, Nikola	162
Thomson, Joseph John	19
Van de Graaf, Robert Jemison	152
Volta, Alessandro	125; 152

Indice delle costanti

carica del neutrone $q_n = 0$	20	costante magnetica $k_m = 10^{-7} \text{ N/A}^2$	158
carica del protone $q_p = 1.602176 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	20	costante universale dei gas $R = 8.3145 \text{ J/mol K}$	139
carica dell'elettrone $q_e = -1.602176 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	20	magnetone di Bohr $m_B = 9.27400949 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2$	192
carica elementare $e = 1.602176 \cdot 10^{-19} \text{ C}$	20	massa del neutrone $m_n = 1.674927 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	20
costante di Boltzmann $k = 1.38066 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$	139	massa del protone $m_p = 1.672622 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	20
costante di Faraday $F = 96\,485.3399 \text{ C/mol}$	20	massa dell'elettrone $m_e = 9.109382 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$	20
costante di gravitazione universale $\gamma = 6.67428 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$	23; 40	numero di Avogadro $N_A = 6.022 \cdot 10^{23} \text{ 1/mol}$	20; 139
costante di Planck $h = 6.6256 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$	192	permeabilità magnetica del vuoto $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$	158
costante di Stefan-Boltzmann $\sigma = 5.67032 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$	142	permettività elettrica del vuoto $\varepsilon_0 = 8.85418781762 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$...	24
costante elettrica $k_e = 8.9874 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$	24; 159	velocità della luce $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$	29; 159

Indice delle unità di misura

ampere (A).....	16; 125; 175	joule (J).....	46
ångström (Å).....	26	mho (Ω^{-1}).....	133
coulomb (C).....	16	ohm (Ω).....	133
elettronvolt (eV)	49	siemens (S)	133
farad (F)	88; 91	steradiante (sr)	41
gauss (G).....	162	tesla (T)	162; 170
henry (H)	205	volt (V)	49
		weber (Wb).....	176

Indice degli argomenti

agitazione		
termica	139	
amperometro	155	
angolo		
solido	41	
approssimazione		
di dipolo	57	
armature	91	
atomo	19	
aurora boreale	167	
 batteria	152	
bilancia		
di torsione	23; 158	
bottiglia		
di Leida	96	
magnetica	<i>vedi</i> specchio magnetico	
bussola	157	
 calamita	157	
campo	28	
costante	<i>vedi</i> campo stazionario	
elettrico	28	
elettromagnetico	243	
elettromotore	147	
irrotazionale	72	
magnetico	160; 171	
magnetizzante	<i>vedi</i> induzione magnetica	
omogeneo	<i>vedi</i> campo uniforme	
solenoidale	131; 196	
stazionario	35	
uniforme	35	
capacità		
elettrica (per un condensatore)	91	
elettrica (per un conduttore)	88	
capacitanza	<i>vedi</i> capacità elettrica	
carica	16	
di conduzione	77	
di polarizzazione	108	
elementare	20	
esploratrice	27	
libera	109	
cavo		
coassiale	182	
 centro		
di carica	25	
ciclotrone	165	
circuitazione	48	
circuiti		
in transitorio	227	
oscillanti	237	
circuito		
elettrico	147	
LC	237	
RC	227	
RL	233	
RLC	238	
coefficiente		
di temperatura	134	
coefficienti		
di capacità	101	
di potenziale	101	
condensatore	91	
cilindrico	95	
piano	92	
sferico	97	
condensatori		
in parallelo	100	
in serie	100	
conducibilità	<i>vedi</i> conduttività	
conduttanza		
elettrica	133	
conduttività		
elettrica	134	
coppie		
di Cooper	145	
corpo		
carico	16	
elettrizzato	11	
neutro	16	
scarico	11	
corrente	16	
concatenata	179	
conduzione	218	
di Ampère	<i>vedi</i> corrente di magnetizzazione	
di conduzione	248	
di Foucault	204	
di magnetizzazione	217	
di spostamento	249	
elettrica	125	

media	125	elettrostatica	11
extra		emissione	
di apertura	235	a effetto di campo	81
di chiusura	234	fotoelettrica	81
indotta	200	termoionica	81
costante		emissività	142
di Boltzmann	139	energia	
di Faraday	20	elettrica	51
di gravitazione universale	23; 40	elettrica (in un condensatore)	98
di Stefan-Boltzmann	142	elettrica (in un conduttore)	89
di tempo (RC)	228	magnetica	210
di tempo (RL)	234	potenziale	
dielettrica del vuoto .. <i>vedi</i> permittività		elettrica	46
elettrica del vuoto		equazione	
universale dei gas	139	delle onde	<i>vedi</i> eq. di d'Alembert
criterio		elettromagnetiche	255
di Faraday	34; 160	di continuità della carica elettrica ..	130
densità		di d'Alembert	255
di carica	127	di Laplace	75
lineare	17	di Poisson	75
superficiale	17	equilibrio	
volumica	17	elettrostatico	77
di corrente		equivalente	
lineare	127	meccanico della caloria	142
superficiale	127	esperimento	
di energia		di Leida	96
elettrica	53; 99		
magnetica	210	fasce	
di particelle	127	di Van Allen	167
dipolo		fattore	
elettrico	57	di Lorentz	245
magnetico	185	di merito	240
divergenza	69	fem. <i>vedi</i> forza elettromotrice	
effetto		fenomeno	
corona	84	statico	131
Hall	168	stazionario	131
Joule	<i>vedi</i> legge di Joule	fisica	
punta	84	relativistica	243
eletttrizzazione	11	flusso	37
resinosa	12	forno	
vetrosa	12	a microonde	87
elettrodinamica	133	forza	
elettromagnetismo	11	conservativa	46
elettrometro	155	di Coulomb	24
eletttrone	20	di Heaviside	165
elettroscopio		di Laplace	169
a foglie	18	di Lorentz	158; 162
		elettrica	<i>vedi</i> forza di Coulomb
		elettromotrice	148

indotta	199	prima.....	173
gravitazionale.....	26	seconda	169
magnetica.....	<i>vedi</i> forza di Lorentz	di Lenz.....	201
funzione		di Maxwell	
armonica	76	prima.....	70
		quarta.....	196
gabbia		seconda	72
di Faraday	87	terza	196
gas		di Ohm	
di elettroni.....	77	infinitesima.....	136
generatore		prima.....	133
di Van de Graaf.....	152	seconda	134
elettrico.....	147	di Stefan-Boltzmann.....	142
elettrostatico.....	152	linee	
ideale.....	147	di campo	<i>vedi</i> linee di flusso
reale	150	di flusso	
gradiente	47	elettrico.....	34
		magnetico	160
induttanza	205; 213	di forza.....	<i>vedi</i> linee di flusso
auto	213		
mutua	213	maglia.....	154
induttore.....	205	magnete	157
induttori		magnetizzazione	157; 217
in parallelo	212	vettore.....	220
in serie	212	magnetone	
induzione		di Bohr.....	192
elettrica	112	magnetostatica	11
elettromagnetica.....	199	massa	
di movimento	202	elettrica	<i>vedi</i> carica
di trasformazione	203	materiale	
elettrostatica.....	14; 82	conduttore.....	12; 77
completa.....	35; 86	ohmico	133
magnetica.....	221	diamagnetico	217
magnetoelettrica.....	248	dielettrico.....	103
ione	21	ferromagnetico.....	217
isotopo	22	isolante	12
		magnetico	215
lacuna.....	128	paramagnetico	217
laplaciano.....	75; 254	superconduttore	145
legge		mobilità	
di Ampère-Maxwell.....	249	di deriva.....	141
di Biot-Savart.....	161	modello	
di Faraday-Henry	199	di Bohr.....	19
di Felici.....	200	di Drude.....	138
di Joule.....	142	di Rutherford	19
di Kirchhoff		di Thomson.....	19
prima.....	153	momento	
seconda	154	angolare	
di Laplace elementare		intrinseco	192

orbitale	192	di conservazione	
di dipolo		della carica.....	16; 130
elettrico	57	problema	
magnetico.....	185; 188	di Cauchy.....	76
intrinseco	192	di Dirichlet.....	75
orbitale	192	di Neumann	75
multimetro	155	protone.....	20
nabla	48; 254	pulsazione	
neutrone	20	critica	238
nodo	153	di ciclotrone.....	165
numero		forzante.....	239
atomico	21	propria	237
di Avogadro	20; 139	raggi catodici	36
di massa	22	raggio	
paradosso		di Bohr.....	26
di Ampère	248	ramo.....	153
parafulmine.....	84	regola	
pendolo		della mano destra.....	161; 188
di sambuco	13	d'oro di du Fay.....	13
permeabilità		resistenza	
magnetica.....	218	elettrica	133
del vuoto	158	Hall	168
relativa	216	interna.....	150
permettività		resistività	
elettrica	109	elettrica	134
del vuoto	24	resistore	133
relativa	105	resistori	
pila	152	in parallelo	144
polarizzabilità		in serie	144
elettronica	108	rigidità	
polarizzazione.....	15; 108	dielettrica	84; 106
elettronica	<i>vedi</i> polarizz. per	risonanza.....	240
orientamento		rotore	71
per deformazione	108	scarica	
per orientamento	108	elettrica	84
vettore	111	schermo elettrostatico.....	<i>vedi</i> gabbia di
polinomi		Faraday	
di Legendre	63	selettore	
polo		di velocità	163
geografico	162	sistema	
magnetico.....	157	di Frenet.....	195
morsetto	147	solenoidale.....	206
potenziale		toroidale.....	184
elettrico	49	specchio	
pressione		magnetico	167
elettrostatica.....	80	spettrometro	
principio		di Dempster	166

spin <i>vedi</i> momento angolare intrinseco	
spostamento	
elettrico <i>vedi</i> induzione elettrica	
superficie	
equipotenziale 50	
suscettività	
elettrica 112	
magnetica 221	
tempo	
di rilassamento 140	
tensione	
di rottura 106	
elettrica 91	
extra	
di chiusura 234	
teorema	
del rotore 72; 196	
della divergenza 70; 196	
di Ampère 179	
di equivalenza 191	
di Coulomb 79	
di Earnshaw 76	
di Gauss	
elettrico 39; 43	
magnetico 176	
terra 86	
trasferitore	
di carica 18	
tubo	
a raggi catodici 36	
di flusso 35	
velocità	
della luce 29; 159; 246; 255	
di deriva 127; 140	
termica 139	
voltmetro 155	
vuoto 23	