

Maurizio Zani

Raccolta di lezioni per  
**Onde**

Onde elettromagnetiche. Ottica



*“I want to break free  
from your lies...”*

*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

*Febbraio, 2016*



# Sommario

<b>Onde.....</b>	<b>9</b>
Equazione delle onde .....	9
Onde piane .....	12
Onde piane armoniche .....	14
<i>Vettori rotanti</i> .....	16
<i>Serie e trasformata di Fourier</i> .....	18
<i>Battimenti</i> .....	20
<i>Pacchetto d'onde</i> .....	22
Onde sferiche .....	23
Onde stazionarie.....	24
<b>Onde elettromagnetiche .....</b>	<b>25</b>
Onde elettromagnetiche .....	25
<i>Equazione delle onde elettromagnetiche</i> .....	26
<i>Indice di rifrazione</i> .....	28
<i>Impedenza del vuoto</i> .....	29
Onde elettromagnetiche piane.....	30
Onde elettromagnetiche piane armoniche.....	33
<i>Energia</i> .....	34
<i>Intensità</i> .....	39
<i>Quantità di moto</i> .....	40
<i>Polarizzazione</i> .....	43
<i>Spettro elettromagnetico</i> .....	47
Onde elettromagnetiche stazionarie .....	48
<b>Emissione e interazione elettromagnetica.....</b>	<b>51</b>
Emissione elettromagnetica .....	51
<i>Carica accelerata</i> .....	51
<i>Dipolo elettrico oscillante</i> .....	54
Interazione con la superficie .....	55
<i>Leggi di Snell</i> .....	56
<i>Riflessione totale</i> .....	59
<i>Leggi di Fresnel</i> .....	60
<i>Rifrazione totale</i> .....	63
<i>Riflettanza e trasmittanza</i> .....	64
Modello atomico .....	67
<i>Modello di Lorentz</i> .....	67
<i>Permittività elettrica relativa</i> .....	70
<i>Modello di Lorentz-Drude</i> .....	72
Interazione con la materia .....	73
<i>Plasma</i> .....	75
<i>Materiali rarefatti</i> .....	76
<i>Materiali dispersivi</i> .....	82
<i>Materiali diffondenti</i> .....	84
<i>Materiali conduttori</i> .....	86
<i>Materiali trasparenti</i> .....	90
<b>Ottica geometrica.....</b>	<b>91</b>
Principio di Fermat .....	92
<i>Riflessione</i> .....	93
<i>Rifrazione</i> .....	94

Anisotropia.....	95
<i>Birifrangenza</i> .....	95
<i>Dicroismo</i> .....	95
<i>Polarizzazione</i> .....	95
<b>Ottica ondulatoria.....</b>	<b>97</b>
Coerenza .....	97
Principio di Huygens-Fresnel.....	99
Interferenza .....	100
<i>Due sorgenti coerenti</i> .....	101
<i>Due sorgenti incoerenti</i> .....	105
<i>Multiple sorgenti coerenti</i> .....	106
<i>Lamina sottile</i> .....	111
<i>Strato anti-riflesso</i> .....	113
Diffrazione.....	114
<i>Fenditura rettilinea</i> .....	115
<i>Fenditura circolare</i> .....	118
<i>Limite di diffrazione</i> .....	120
<i>Doppia fenditura</i> .....	121
<i>Reticolo di diffrazione</i> .....	122
<b>Bibliografia.....</b>	<b>123</b>
<b>Indice .....</b>	<b>125</b>
Indice degli autori .....	125
Indice delle costanti .....	126
Indice degli argomenti .....	127



# 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)
- D. Halliday, R. Resnick, K. S. Krane**, *Fisica 2*, Casa Editrice Ambrosiana (2004)



# Indice

## Indice degli autori

Airy, George Biddell .....	118	Huygens, Christiaan .....	99
Ampère, André Marie .....	35	Lambert, Johann Heinrich .....	81
Beer, August .....	81	Land, Edwin Herbert .....	95
Brewster, Sir David .....	63	Larmor, Joseph .....	53
Cauchy, Augustin-Louis .....	78	Liénard, Alfred-Marie .....	53
Cavendish, Henry .....	41	Lorentz, Hendrik Antoon.....	35; 67
Coulomb, Charles Augustin.....	35; 41	Malus, Étienne-Louis .....	46
d'Alembert, Jean Baptiste Le Rond.....	11	Maxwell, James Clerk .....	27; 35
Descartes, René .....	92	Newton, Isaac .....	92
Dirichlet, Peter Gustav Lejeune.....	18	Nichols, Ernest Fox .....	41
Drude, Paul Karl Ludwig.....	72	Poynting, John Henry .....	38
Faraday, Michael .....	36	Rayleigh, John William Strutt .....	85
Fermat, Pierre de.....	92	Sellmeier, Wolfgang.....	79
Foucault, Jean Bernard Léon .....	28; 92	Snell, Willebrord .....	58
Fourier, Jean Baptiste Joseph.....	18	Thomson, Joseph John .....	67; 85
Fresnel, Augustin-Jean .....	60	Tolomeo, Claudio .....	58
Heaviside, Oliver .....	35	Wiener, Otto .....	49
Henry, Joseph .....	36		
Hertz, Heinrich Rudolf .....	27		
Hull, Gordon Ferrie .....	41		

## Indice delle costanti

carica dell'elettrone		
$q_e = -1.602176 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .....	68	
costante di Planck		
$h = 6.6256 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ .....	42	
impedenza del vuoto		
$Z_0 = 377 \text{ } \Omega$ .....	29	
massa dell'elettrone		
$m_e = 9.109382 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ .....	68	
permeabilità magnetica del vuoto		
$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$ .....	27	
permettività elettrica del vuoto		
$\varepsilon_0 = 8.85418781762 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/\text{Nm}^2$ ...	27	
raggio classico dell'elettrone		
$r_0 = 2.82 \cdot 10^{-15} \text{ m}$ .....	85	
raggio di Bohr		
$a_0 = 0.53 \text{ } \text{Å}$ .....	68	
velocità della luce		
$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$ .....	14; 27	

## Indice degli argomenti

ampiezza	
dell'onda .....	14
angolo	
critico .....	59
di Brewster .....	63
limite .....	<i>vedi</i> angolo critico
antinodo .....	<i>vedi</i> ventre; <i>vedi</i> ventre
anti-trasformata	
di Fourier .....	19
asse	
del polarizzatore .....	46; 95
ottico .....	95
assorbimento .....	65; 81
battimento .....	21
bilancia	
di torsione .....	41
birifrangenza .....	95
campo	
elettrico .....	25
di radiazione .....	51
magnetico .....	25
coefficiente	
di assorbimento .....	81
di riflessione .....	60
di trasmissione .....	60
coefficienti	
di Cauchy .....	78
di Fresnel .....	<i>vedi</i> leggi di Fresnel
di Sellmeier .....	79
coerenza .....	97
conducibilità	
elettrica .....	86
criterio	
di Rayleigh .....	120
densità	
di energia	
elettrica .....	34
elettromagnetica .....	34; 37
magnetica .....	34
dicroismo .....	95
differenza	
di cammino	
fisico .....	97
ottico .....	97
di fase .....	44; 97
intrinseca .....	97
disco	
di Airy .....	118
dispersione	
angolare .....	52; 77
anomala .....	79
cromatica .....	77
normale .....	77
effetto	
pelle .....	87
equazione	
delle onde .....	<i>vedi</i> eq. di d'Alembert
elettromagnetiche .....	26
di d'Alembert	
monodimensionale .....	11; 27
tridimensionale .....	13
di Helmholtz .....	17
equazioni	
di Maxwell .....	25
esperimento	
di Young .....	100
etere .....	92
fase	
iniziale .....	14
fattore	
di Lorentz .....	53
figura	
di diffrazione .....	114
di interferenza .....	100
formula	
di Eulero .....	16
forza	
di Coulomb .....	35
di Heaviside .....	35
di Lorentz .....	35
fotone .....	42
frequenza .....	15
fronte	
d'onda .....	12
funzione	
d'onda	

monodimensionale.....	9	modello	
tridimensionale .....	12	di Drude.....	88
di Bessel.....	118	di Lorentz .....	67
di Lorentz.....	81	di Lorentz-Drude .....	72
impedenza		di Thomson.....	67
del vuoto .....	29	nabla .....	13
indice		nodo.....	24; 49
di rifrazione.....	28; 77	numero	
ordinario.....	95	d'onda .....	14
straordinario.....	95	d'ordine .....	101
integrale		onda .....	9
di Fourier .....	19	elettromagnetica .....	27; 37
intensità.....	39	piana .....	30
media .....	39	armonica .....	33
interferenza		evanescente.....	59
costruttiva .....	24; 100	piana .....	12
distruttiva.....	24; 100	armonica .....	14
laplaciano.....	13	monocromatica .....	<i>vedi</i> onda piana
legge		armonica	
di Ampère-Maxwell.....	35	polarizzata .....	43
di Cauchy.....	78	sferica .....	23
di Faraday-Henry.....	36	stazionaria.....	24
di Lambert-Beer.....	81	elettromagnetica .....	48
di Larmor.....	53	TEM .....	32
di Liénard.....	53	ordine	
di Malus .....	46	dell'armonica.....	18
di Rayleigh.....	85	ottica .....	91
di Sellmeier.....	79	fisica .....	<i>vedi</i> ottica ondulatoria
di Thomson.....	85	geometrica .....	91
leggi		ondulatoria.....	97
di Fresnel .....	60	pacchetto	
di Snell (riflessione).....	57; 93	d'onde.....	22
di Snell (rifrazione).....	58; 94	passo .....	101
lorenziana .....	<i>vedi</i> funzione di Lorentz	permeabilità	
luce		magnetica .....	28
naturale .....	<i>vedi</i> luce ordinaria	relativa .....	28
ordinaria.....	46	permettività	
visibile .....	47	elettrica .....	28
lunghezza		relativa .....	28
d'onda .....	15	piano	
materiali		di incidenza .....	55
conduttori.....	86	di oscillazione.....	43
diffondenti .....	84	plasma.....	75
dispersivi.....	82	polarizzatore .....	46
rarefatti .....	76	polarizzazione.....	43; 70
trasparenti .....	90	circolare.....	45

ellittica .....	44	lineare .....	120
lineare .....	43	risonanza.....	69
polaroid.....	95		
pressione		schermo	
di radiazione .....	41	elettromagnetico .....	87
principio		serie	
di Fermat.....	92	di Fourier .....	18
di Huygens-Fresnel.....	99	sezione	
di minima azione .....	92	d'urto	
di reversibilità .....	92	di diffusione.....	84
di sovrapposizione		sorgenti	
delle onde.....	11	coerenti .....	98
variazionale.....	92	incoerenti .....	98
profilo		sincrone .....	98
temporale .....	10	spato d'Islanda.....	95
pulsazione .....	14	spettro	
critica .....	69	elettromagnetico .....	47
di plasma.....	70; 75	strato	
fondamentale .....	18	anti-riflesso.....	113
forzante .....	68		
propria.....	67	TE	
radiazione		onda	
elettromagnetica.....	<i>vedi onda</i>	TE .....	60
elettromagnetica		tempo	
raggi		di rilassamento.....	88
luminosi .....	91	teorema	
raggio		di Poynting .....	38
dell'elettrone		TM	
classico.....	85	onda	
di Bohr .....	68	TM.....	60
rapporto		trasformata	
di estinzione.....	46	di Fourier .....	19
relazione		trasmittanza .....	64
di dispersione.....	14		
reticolo		velocità	
di diffrazione.....	122	della luce .....	27
riflessione .....	55	di fase .....	14
totale .....	59	di gruppo .....	21
riflettanza.....	64	ventre.....	24; 49
rifrazione.....	55	vettore	
totale .....	63	d'onda.....	15
risoluzione		di Poynting .....	38
angolare .....	120		