

# FISICA



FERRARI ♦ LUCI ♦ MARIANI ♦ PELISSETTO

# FISICA

*Volume Secondo*

**ELETTROMAGNETISMO E OTTICA**

  
IDELSON-GNOCCHI

© 2009 CASA EDITRICE IDELSON-GNOCCHI srl - Editori dal 1908  
Sorbona • Grasso • Morelli • Liviana Medicina • Grafite  
Via M. Pietravalle, 85 - 80131 Napoli - Tel. +39-081-5453443 pbx - Fax +39-081-546499  
12385 N.W. Highway 225A Reddick, FL 32686 - Tel. 001-352591-1136 - Fax 001-352591-1189  
**<http://www.idelson-gnocchi.com>**                      **E-mail: [info@idelson-gnocchi.com](mailto:info@idelson-gnocchi.com)**

# Autori

**VALERIA FERRARI**

Professore Ordinario di Fisica Teorica  
Dipartimento di Fisica  
Sapienza Università di Roma

**CLAUDIO LUCI**

Professore Associato di Fisica Sperimentale  
Dipartimento di Fisica  
Sapienza Università di Roma

**CARLO MARIANI**

Professore Ordinario di Struttura della Materia  
Dipartimento di Fisica  
Sapienza Università di Roma

**ANDREA PELISSETTO**

Professore Associato di Fisica Teorica  
Dipartimento di Fisica  
Sapienza Università di Roma



# Indice

<b>Autori</b>	<b>v</b>
<b>Indice delle tabelle</b>	<b>xiii</b>
<b>Prefazione al secondo volume</b>	<b>xv</b>
<b>16 L'interazione elettrostatica</b>	<b>625</b>
<b>16.1</b> Densità di carica	628
<b>16.2</b> Esperimenti elementari di elettrostatica	629
<b>16.2.1</b> Come si misura la carica elettrica: l'elettroscopio	630
<b>16.3</b> La legge di Coulomb nel vuoto	632
<b>16.3.1</b> Il principio di sovrapposizione	634
<b>16.4</b> Il campo elettrico	639
<b>16.4.1</b> Linee di forza e direzione del campo elettrico	641
<b>16.5</b> Il dipolo elettrico	648
<b>16.6</b> Esercizi	651
<b>17 Teorema di Gauss e sue applicazioni</b>	<b>655</b>
<b>17.1</b> Flusso di un vettore attraverso una superficie orientata	656
<b>17.2</b> Il teorema di Gauss	658
<b>17.2.1</b> Dimostrazione del teorema di Gauss in un caso semplice	659
<b>17.2.2</b> Dimostrazione del teorema di Gauss nel caso generale	660
<b>17.3</b> Considerazioni di simmetria	664
<b>17.3.1</b> Campo generato da due cariche puntiformi sull'asse di simmetria	665
<b>17.3.2</b> Sfera uniformemente carica	665
<b>17.3.3</b> Filo infinito uniformemente carico	667
<b>17.3.4</b> Lastra infinita uniformemente carica	667
<b>17.4</b> Applicazioni del teorema di Gauss: calcolo del campo elettrico	668
<b>17.4.1</b> Sfera carica	668
<b>17.4.2</b> Filo infinito	673
<b>17.4.3</b> Lamina piana infinita	677
<b>17.4.4</b> Doppio strato	679
<b>17.4.5</b> Lastra infinita	683

17.5	Campo elettrico sull'asse di un anello carico	686
17.6	Esercizi	690
<b>18</b>	<b>Il potenziale elettrostatico</b>	<b>693</b>
18.1	La forza elettrostatica è conservativa	694
18.1.1	Energia potenziale di un sistema formato da due cariche puntiformi	696
18.2	Il potenziale elettrostatico	696
18.2.1	Relazione tra lavoro e differenza di potenziale	698
18.2.2	Differenza di potenziale in un campo elettrico uniforme	698
18.2.3	Potenziale di un sistema di cariche puntiformi	700
18.2.4	Superfici equipotenziali	708
18.3	Potenziale generato da distribuzioni continue di carica	713
18.3.1	Sfera carica	713
18.3.2	Filo infinito	714
18.3.3	Anello carico	715
18.4	Potenziale elettrostatico del dipolo	717
18.5	Energia di un dipolo in un campo elettrico esterno	717
18.6	Potenziale generato da $N$ cariche elettriche: approssimazione di dipolo	718
18.7	Energia potenziale elettrostatica	722
18.8	Esercizi	727
<b>19</b>	<b>Conduttori e condensatori</b>	<b>731</b>
19.1	Conduttori e isolanti	732
19.2	Proprietà dei conduttori	734
19.3	Induzione elettrostatica	738
19.3.1	Induzione elettrostatica completa	740
19.3.2	Un esempio di induzione completa	743
19.4	Capacità elettrostatica di un conduttore	744
19.5	Lavoro necessario per caricare un conduttore	747
19.6	Condensatori	748
19.6.1	Condensatore piano	749
19.6.2	Condensatore sferico	751
19.6.3	Condensatore cilindrico	752
19.6.4	Energia elettrostatica di un condensatore	753
19.7	Circuiti con condensatori	756
19.7.1	Condensatori in serie	756
19.7.2	Condensatori in parallelo	757
19.8	Campi elettrici nei materiali isolanti	760
19.8.1	Polarizzazione dei dielettrici	761
19.8.2	Campo elettrico generato da un dielettrico polarizzato	762
19.8.3	Campo elettrico all'interno di un condensatore con dielettrico	765
19.8.4	Campo elettrico nella materia	766
19.8.5	Capacità di un condensatore con dielettrico	767



19.9	Esercizi	774
<b>20</b>	<b>La corrente elettrica e la legge di Ohm</b>	<b>777</b>
20.1	La corrente elettrica	778
20.1.1	Densità di corrente	783
20.1.2	Relazione tra corrente e densità di corrente	784
20.2	Resistenza elettrica e legge di Ohm	786
20.2.1	La seconda legge di Ohm	788
20.2.2	Relazione tra campo elettrico e densità di corrente	789
20.2.3	Un'analogia meccanica per la legge di Ohm	790
20.3	Resistenze in serie ed in parallelo	792
20.3.1	Resistenze in serie	792
20.3.2	Resistenze in parallelo	793
20.4	Generatore di tensione	796
20.4.1	Generatore di tensione reale	797
20.5	Dissipazione di energia nei circuiti elettrici: effetto Joule	801
20.6	Leggi di Kirchhoff	807
20.7	Circuito RC	812
20.7.1	Carica di un condensatore	812
20.7.2	Scarica di un condensatore	814
20.8	Esercizi	819
<b>21</b>	<b>Il campo magnetico</b>	<b>823</b>
21.1	Il campo magnetico di un magnete	825
21.2	Campo magnetico generato da una corrente elettrica	828
21.2.1	Campo magnetico generato da un filo infinito rettilineo percorso da corrente	829
21.2.2	Campo magnetico generato da un circuito di forma qualsiasi	833
21.2.3	Campo magnetico al centro di una spira	834
21.3	Il teorema di Gauss per il campo magnetico	836
21.4	Teorema della circuitazione	837
21.4.1	Campo magnetico di un solenoide	841
21.4.2	Campo magnetico di un toroide	844
21.5	Esercizi	847
<b>22</b>	<b>Le forze magnetiche</b>	<b>851</b>
22.1	Forza magnetica su un circuito percorso da corrente	852
22.2	La forza di Lorentz	856
22.3	Moto di una carica in un campo magnetico uniforme	858
22.3.1	Velocità perpendicolare al campo magnetico	858
22.3.2	Caso generale	859
22.4	Momento di dipolo magnetico di una spira percorsa da corrente	866
22.5	Cenni di magnetismo nella materia	870
22.5.1	I diversi tipi di magnetismo	870
22.5.2	Il campo magnetico in un mezzo magnetizzato	875

	<b>22.5.3</b>	Campo magnetico nella materia	876
<b>22.6</b>		Esercizi	881
<b>23</b>		<b>Induzione magnetica</b>	<b>885</b>
<b>23.1</b>		Esperimenti sull'induzione magnetica	886
<b>23.2</b>		Flusso concatenato a una linea chiusa	887
<b>23.3</b>		Legge di Faraday: la forza elettromotrice indotta.	889
	<b>23.3.1</b>	La legge di Lenz	890
	<b>23.3.2</b>	Campo elettromotore	894
<b>23.4</b>		Relazione tra la legge di Faraday e la forza di Lorentz	895
<b>23.5</b>		Considerazioni energetiche	896
<b>23.6</b>		Generatore di tensione alternata	900
<b>23.7</b>		Autoinduzione	901
	<b>23.7.1</b>	Induttanza di un solenoide	902
<b>23.8</b>		Effetti induttivi nei circuiti elettrici	903
	<b>23.8.1</b>	Circuito RL	904
<b>23.9</b>		Legge di Ampère-Maxwell	907
<b>23.10</b>		Equazioni di Maxwell	910
<b>23.11</b>		Esercizi	913
<b>24</b>		<b>Le onde</b>	<b>917</b>
<b>24.1</b>		Equazione delle onde	918
	<b>24.1.1</b>	Onde progressive e onde regressive	919
	<b>24.1.2</b>	Il principio di sovrapposizione	921
	<b>24.1.3</b>	Onde longitudinali e trasversali	922
<b>24.2</b>		Onde trasversali: su una corda tesa	923
<b>24.3</b>		Onde sinusoidali	925
<b>24.4</b>		Energia trasportata da un'onda in una corda elastica	931
<b>24.5</b>		Interferenza e battimenti	935
	<b>24.5.1</b>	Interferenza	935
	<b>24.5.2</b>	Battimenti	936
<b>24.6</b>		Onde acustiche	938
	<b>24.6.1</b>	Intensità delle onde acustiche	942
	<b>24.6.2</b>	Onde sferiche	945
<b>24.7</b>		Onde stazionarie	946
<b>24.8</b>		Acustica musicale	952
<b>24.9</b>		Effetto Doppler	955
<b>24.10</b>		Esercizi	965
<b>25</b>		<b>Ottica</b>	<b>967</b>
<b>25.1</b>		Le onde elettromagnetiche	969
	<b>25.1.1</b>	Onde sinusoidali: un breve sommario	971
	<b>25.1.2</b>	Intensità di un'onda elettromagnetica	973
<b>25.2</b>		Lo spettro elettromagnetico	977
<b>25.3</b>		Onde elettromagnetiche nella materia	984
<b>25.4</b>		Assorbimento delle onde elettromagnetiche	984
<b>25.5</b>		Interferenza	989
<b>25.6</b>		Diffrazione	993
<b>25.7</b>		Ottica geometrica	996
	<b>25.7.1</b>	Riflessione	997

25.7.2	Rifrazione: la legge di Snell	998
25.7.3	Riflessione totale	1000
25.7.4	Intensità della radiazione riflessa e rifratta	1001
25.7.5	Dispersione cromatica	1006
25.8	Esercizi	1012
<b>26</b>	<b>Sistemi ottici</b>	<b>1015</b>
26.1	Lo specchio	1016
26.1.1	Oggetto e Immagine	1017
26.1.2	Definizioni e convenzioni per gli specchi	1017
26.1.3	Approssimazione di Gauss	1019
26.1.4	Costruzione grafica delle immagini per gli specchi	1020
26.1.5	Equazione caratteristica dello specchio	1021
26.1.6	Ingrandimento di uno specchio	1022
26.1.7	Specchio piano	1023
26.2	Il diottro	1027
26.2.1	Costruzione grafica delle immagini per i diottri sferici	1028
26.2.2	Convenzioni per il diottro	1029
26.2.3	Equazione caratteristica del diottro	1029
26.2.4	Ingrandimento di un diottro	1031
26.2.5	Il diottro piano	1032
26.2.6	Combinazioni di diottri	1036
	<b>Risultati degli esercizi non svolti</b>	<b>613</b>
	<b>Indice analitico</b>	<b>617</b>
26.3	La lente	1039
26.3.1	La lente spessa	1039
26.3.2	La lente sottile	1040
26.3.3	Ingrandimento di una lente sottile	1043
26.3.4	Costruzione grafica delle immagini per una lente sottile	1044
26.3.5	Lente biconvessa e lente biconcava	1045
26.3.6	Combinazioni di lenti sottili	1050
26.4	Strumenti ottici	1052
26.4.1	L'occhio	1053
26.4.2	La lente di ingrandimento	1054
26.4.3	Il microscopio ottico	1055
26.4.4	Il telescopio	1056
26.4.5	Potere risolutivo di un sistema ottico	1058
26.5	Esercizi	1064
	<b>Risultati degli esercizi non svolti</b>	<b>1067</b>
	<b>Indice analitico</b>	<b>1073</b>



# Indice delle tabelle

tab. 18.1	Energia di prima ionizzazione	708
tab. 19.1	Rigidità dielettrica	762
tab. 19.2	Costante dielettrica relativa $\epsilon_r$	766
tab. 20.1	Codice dei colori delle resistenze	788
tab. 20.2	Resistività di alcuni metalli	789
tab. 20.3	Carica del condensatore nel circuito RC	814
tab. 20.4	Corrente di carica nel circuito RC	815
tab. 22.1	Suscettività magnetica $\chi_m = \mu_r - 1$	877
tab. 24.1	Velocità del suono in alcuni mezzi	940
tab. 24.2	Scala temperata e scala naturale di Do	954
tab. 25.1	Massimi e minimi per la diffrazione da un foro	995
tab. 25.2	Indice di rifrazione per alcuni materiali	999



# Prefazione al secondo volume

In questo volume sono descritte le leggi fondamentali dell'elettromagnetismo e dell'ottica e le loro più importanti applicazioni. Nel trattare i vari argomenti abbiamo seguito un approccio induttivo; partendo dall'analisi degli esperimenti eseguiti nel corso dei secoli dai grandi scienziati che hanno posto le basi di questa branca della fisica, abbiamo ricavato le leggi generali che regolano i fenomeni. A tal fine sono state introdotte alcune grandezze matematiche, come flusso e circuitazione di un vettore, utilizzando il formalismo matematico in maniera semplice ma sempre rigorosa. Le equazioni di Maxwell sono state presentate solo in forma integrale.

Abbiamo seguito lo stesso schema didattico del primo volume, ponendo le dimostrazioni che richiedono sviluppi matematici più complessi in box a fondo grigio, esempi significativi e approfondimenti in box a fondo verde e dimensioni e unità di misura delle grandezze fisiche in box a fondo giallo. L'introduzione delle leggi fisiche è sempre accompagnata da problemi risolti che ne spiegano l'applicazione. Questo testo è quindi il naturale completamento del primo volume e può essere adottato insieme ad esso nei corsi di laurea in cui è previsto un solo modulo di fisica generale comprendente meccanica, termodinamica, elettromagnetismo e ottica.

Tuttavia, questo secondo volume è autoconsistente e riteniamo che possa essere adottato anche nei corsi di laurea in cui è previsto un modulo di elettromagnetismo e ottica a se stante, come ad esempio in alcuni corsi di ingegneria.

*Gli Autori*