

Emilio Doni

Elementi di elettricità e di magnetismo

*spiegati con le leggi classiche
ed esposti per l'uso dei licei*



Edizioni ETS



www.edizioniets.com

Emilio Doni

Dipartimento di Fisica dell'Università di Pisa,
largo B. Pontecorvo 3, 56127 Pisa

e

NEST, Istituto di Nanoscienze – CNR e Scuola Normale Superiore,
piazza San Silvestro 12, 56127 Pisa

© Copyright 2013
EMILIO DONI

ISBN 978-884673675-8

Indice

Per cominciare	xvii
Contenuti	xviii
Criteri	xx
Riconoscimenti	xxii
Campi: elettricità (senza dipendenza dal tempo)	1
1 Prologo	3
2 Strumenti	5
2.1 Cos'è un campo	5
2.2 Quale campo per i fenomeni elettrici	6
2.3 La carica e le sorgenti di un campo	7
2.4 Il campo elettrico	8
2.5 Una analogia: il campo gravitazionale	9
3 Operazioni	11
3.1 Grandezze fisiche e matematica per descriverle	11
3.2 Curve e superfici nello spazio	12
3.3 Operazioni possibili per un campo scalare	13
3.4 Ancora su curve e superfici nello spazio	15
3.5 Operazioni per i campi vettoriali	16
3.5.1 Operazioni per un campo vettoriale su una curva	17
3.5.2 Operazioni per un campo vettoriale su una superficie	18
3.5.3 Sono state definite operazioni lineari	20
4 Il flusso del campo elettrico	23
4.1 Questioni di metodo	23
4.1.1 Un esempio	24
4.2 La legge del flusso del campo elettrico	25
4.2.1 La permittività del vuoto	26

5	Primo intermezzo sulle unità di misura	27
6	Distribuzioni di carica e campo elettrico	29
6.1	Campo elettrico dovuto a carica puntiforme	30
6.1.1	Significato dei criteri di invarianza	31
6.1.2	Criteri di invarianza nel caso di carica puntiforme	31
6.1.3	Soluzione dell'equazione del flusso del campo elettrico	33
6.2	Una osservazione sulle dimensioni dello spazio	35
6.3	L'equazione del flusso del campo elettrico è lineare	35
6.4	Campo elettrico di un filo rettilineo carico	38
6.4.1	Criteri di invarianza	38
6.4.2	Conseguenze dei criteri di invarianza	39
6.4.3	Soluzione dell'equazione del flusso del campo elettrico	43
6.5	Campo elettrico di una superficie piana carica	44
6.5.1	Criteri di invarianza per una superficie piana carica e conseguenze	45
6.5.2	Soluzione dell'equazione del flusso del campo elettrico	47
6.6	Campo elettrico di una sfera uniformemente carica	49
6.6.1	Un problema di meccanica	51
6.6.2	Campo elettrico di una superficie sferica uniformemente carica	52
6.7	Campo elettrico di altre distribuzioni di carica	52
6.7.1	Il campo elettrico di un condensatore	54
7	La circuitazione del campo elettrico	57
7.1	La legge della circuitazione del campo elettrico	58
7.2	Il potenziale del campo elettrico	58
7.2.1	Definizione del potenziale del campo elettrico	60
7.2.2	Alcune proprietà del potenziale del campo elettrico	61
7.3	Dal potenziale del campo elettrico alla meccanica	63
7.3.1	Lavoro della forza prodotta dal campo elettrico	63
7.3.2	Affermazioni equivalenti	66
7.3.3	Energia di un portatore di carica in campo elettrico	66
7.4	Potenziale e movimenti di un corpo carico	67
7.4.1	Regioni dello spazio equipotenziali	67
8	Il potenziale di alcuni campi elettrici	69
8.1	Il potenziale di un campo elettrico uniforme	69
8.1.1	Il potenziale di un condensatore	70
8.2	Potenziale del campo elettrico di carica puntiforme	72
8.2.1	Calcolo di una somma un po' complicata	74
8.3	Potenziale del campo elettrico di un filo carico	77
8.3.1	Calcolo di un'altra somma un po' complicata	79
8.4	Potenziale del campo elettrico di una sfera carica	81
8.4.1	Calcolo di ancora un'altra somma un po' complicata	83
8.4.2	È possibile che il potenziale faccia un salto?	84

8.5	Ricavare il potenziale è un'operazione lineare	89
8.5.1	Una applicazione	90
8.6	Ancora su problemi di meccanica	94
9	Dal potenziale al campo elettrico	99
9.1	Quando il potenziale è uniforme	101
9.2	Qual è la direzione del campo elettrico?	102
9.3	Dove il potenziale ha un massimo o un minimo	103
9.3.1	All'interno di una superficie chiusa equipotenziale	104
10	Grande, piccolo	107
10.1	Differenti punti di vista	108
10.2	Collegare i punti di vista	109
10.3	Energia e dissipazione	111
10.4	Materiali conduttori e materiali isolanti	113
11	Conduttori	115
11.1	All'interno di un conduttore	115
11.1.1	Cariche libere all'interno di un conduttore?	116
11.1.2	E quando il conduttore non è all'equilibrio?	116
11.2	Superficie di un conduttore	117
11.2.1	Campo elettrico di una superficie conduttrice piana carica	119
12	Correnti	123
12.1	Densità di corrente	124
12.1.1	Il flusso della densità di corrente	126
12.1.2	Flusso della densità di corrente su una superficie chiusa	127
12.2	La carica si conserva	129
12.3	Densità di corrente stazionaria	130
12.3.1	Una proprietà dei campi vettoriali con flusso nullo	130
12.4	Corrente stazionaria	132
12.4.1	E in condizioni non stazionarie?	134
12.4.2	Conduttori che si dividono in più rami	136
12.5	Corrente e campo elettrico	138
12.6	Cos'è la conduttività?	139
12.6.1	Cosa capita all'interno di un conduttore	139
12.6.2	Conduttività e quantità medie	141
12.6.3	Cosa ostacola il moto degli elettroni liberi?	142
13	Circuiti	147
13.1	Pile, batterie, accumulatori	147
13.2	Un circuito elementare	148
13.2.1	Campo elettrico dentro una barretta conduttrice	148
13.2.2	Resistenza di una barretta di conduttore	150

13.2.3	La legge di Ohm	151
13.2.4	Resistenza di un conduttore di forma qualunque	152
13.3	Circuiti resistivi in corrente continua	158
13.3.1	Direzioni in un conduttore	161
13.4	Potenza dissipata in un conduttore	162
13.4.1	Qualche esempio	164
14	Polarizzazione	167
14.1	Mezzi polari, mezzi non polari	167
14.1.1	Mezzi, polari o non polari, in campo elettrico	169
14.2	Dipolo elettrico	170
14.2.1	Momento di dipolo elettrico	171
14.2.2	Campo elettrico prodotto da un dipolo elettrico	171
14.2.3	E il potenziale?	178
14.3	Un dipolo in campo elettrico	179
14.3.1	Energia potenziale di un dipolo in campo elettrico	179
14.4	Campo di polarizzazione	180
14.4.1	Media sulla polarizzazione microscopica	181
15	Equazioni del campo nei mezzi polarizzabili	183
15.1	Come trattare la carica microscopica	184
15.1.1	Carica microscopica e flusso del campo di polarizzazione	185
15.2	Il campo di spostamento elettrico	187
15.2.1	L'equazione del flusso del campo di spostamento elettrico	188
15.3	Collegamento tra il campo elettrico e il campo di spostamento elettrico	188
15.3.1	La suscettività elettrica	189
15.3.2	La costante dielettrica	190
15.4	Come risolvere l'equazione del flusso del campo di spostamento elettrico	191
15.4.1	Carica puntiforme all'interno di un mezzo omogeneo	192
15.4.2	Insidie e precauzioni	196
15.5	Campi attraverso il bordo di un mezzo materiale	198
15.5.1	Un po' di definizioni e di simboli	198
15.5.2	La componente normale del campo di spostamento elettrico non fa salti	200
15.5.3	La componente normale del campo elettrico può far salti	202
15.5.4	La componente tangenziale del campo elettrico non fa salti	205
15.5.5	La componente tangenziale del campo di spostamento elettrico può far salti	208
15.6	Equazione del flusso del campo di spostamento elettrico e salti del campo	209
15.6.1	Oltre i criteri di precauzione	210
15.6.2	Condensatore con materiale nello spazio tra le facce	214
16	Epilogo provvisorio	219

Campi: magnetismo (senza dipendenza dal tempo)	221
17 Un nuovo prologo	223
18 Il campo di induzione magnetica	225
18.1 La carica c'entra con i fenomeni magnetici?	225
18.2 Il campo di induzione magnetica e la sua sorgente	228
18.2.1 Un commento sul metodo	229
19 La forza sulla carica in moto	231
19.1 La forza di Lorentz	231
19.1.1 Determinare il campo di induzione magnetica	232
19.2 Moto di un corpo carico in presenza di campo di induzione magnetica . . .	235
19.2.1 L'energia non varia per effetto del campo	235
19.2.2 Traiettoria di un corpo carico libero in presenza del campo	237
19.3 Forza di Lorentz e correnti	242
19.3.1 Una osservazione importante	243
19.3.2 Forza di Lorentz su un tratto di filo rettilineo percorso da corrente stazionaria	244
20 Dipolo magnetico	247
20.1 Circuito in campo di induzione magnetica	247
20.2 Il momento di dipolo magnetico	249
20.2.1 Dipolo elettrico e dipolo magnetico: analogie e differenze	253
20.2.2 Lavoro delle forze agenti su un circuito in campo di induzione magnetica	254
20.2.3 Energia potenziale di un dipolo magnetico in campo di induzione magnetica	255
20.2.4 Quale forza compie lavoro?	257
21 Il flusso del campo di induzione magnetica	259
21.1 Leggi per il campo di induzione magnetica	259
21.1.1 La legge del flusso del campo di induzione magnetica	260
21.1.2 Dipoli e monopoli	261
22 Circuitazione del campo di induzione magnetica	263
22.1 Campo di induzione magnetica e sue sorgenti	263
22.1.1 Circuitazione del campo di induzione magnetica e correnti stazio- narie	265
22.1.2 La permeabilità magnetica del vuoto	269
22.2 Corrispondenze e diversità	270
23 Dalle calamite ai fili percorsi da corrente	275

24 Effetti magnetici con correnti rettilinee	279
24.1 Soluzione delle equazioni del campo di induzione magnetica	279
24.1.1 Uso dei criteri di invarianza	280
24.1.2 È ovunque nullo il componente radiale del campo di induzione magnetica	284
24.1.3 Anche il componente assiale del campo di induzione magnetica è ovunque nullo	286
24.1.4 Il componente trasversale del campo di induzione magnetica	288
24.2 L'invarianza per riflessione	290
24.2.1 Non tutto si riflette allo stesso modo	292
24.2.2 Riflessioni e inversione	292
24.2.3 Quantità vettoriali che si riflettono allo stesso modo	295
24.2.4 Come si riflette il campo di induzione magnetica	296
24.2.5 Vettori assiali e vettori polari	299
24.2.6 Il ruolo dell'inversione	300
24.2.7 Riflessione di vettori polari o di vettori assiali	304
24.2.8 Uso dei criteri di invarianza con la riflessione	306
24.3 Forze tra fili rettilinei percorsi da corrente	310
24.3.1 Direzioni e versi	310
24.3.2 Campo di induzione magnetica e forza agente tra i fili	311
24.3.3 La forza agente tra i fili e le esperienze di Ampère	312
25 Soluzioni delle equazioni del campo di induzione magnetica	317
25.1 Campo di induzione magnetica dovuto a corrente su una superficie cilindrica	317
25.1.1 Criteri di invarianza per la corrente su una superficie cilindrica	319
25.1.2 I componenti del campo di induzione magnetica	322
25.2 Le equazioni del campo di induzione magnetica sono lineari	327
25.3 Il solenoide	329
25.3.1 Il campo di induzione magnetica generato da un solenoide	331
25.4 Campo di induzione magnetica dovuto a corrente su un piano	336
25.4.1 Calcolo del campo di induzione magnetica	337
25.5 Campo di induzione magnetica e campo elettrico con sorgenti di forma simile	342
25.5.1 Le equazioni dei campi e le loro soluzioni	344
25.6 Campo di induzione magnetica generato da un dipolo magnetico	345
25.6.1 Il campo dovuto a un breve tratto rettilineo di corrente	346
25.6.2 Calcolo di una somma abbastanza complicata	349
25.6.3 Calcolo del campo di induzione magnetica generato da un dipolo magnetico	353
25.6.4 I campi generati da un dipolo magnetico e da un dipolo elettrico	360

26 Secondo intermezzo sulle unità di misura	361
26.1 Unità di misura della corrente	362
26.1.1 Quanto vale la permeabilità magnetica del vuoto?	363
26.2 Unità di misura della carica	364
26.2.1 Quanto vale la permittività elettrica del vuoto?	364
26.3 Unità di misura per grandezze elettriche	365
26.3.1 Unità di misura del potenziale	366
26.3.2 Unità di misura del campo elettrico	366
26.3.3 Unità di misura di resistenza e capacità	367
26.3.4 Unità di misura del campo di polarizzazione e del campo di spostamento elettrico	367
26.4 Unità di misura per grandezze magnetiche	368
26.4.1 Unità di misura del campo di induzione magnetica	368
26.4.2 Unità di misura del flusso del campo di induzione magnetica	369
26.4.3 Unità di misura del campo \mathbf{B}/μ_0	370
26.4.4 Unità di misura del rapporto tra il flusso del campo di induzione magnetica e la corrente	370
27 Fenomeni magnetici nei mezzi materiali	371
27.1 Correnti microscopiche	372
27.1.1 Un elettrone nella sua orbita	372
27.1.2 Dipoli magnetici microscopici	374
27.1.3 La meccanica di Newton vale ancora per gli elettroni legati?	375
27.2 All'origine delle proprietà magnetiche della materia	376
27.2.1 Momento di dipolo magnetico orbitale e di spin	377
27.3 Campo di magnetizzazione	378
27.4 Proprietà magnetiche dei materiali	380
27.4.1 Materiali paramagnetici	380
27.4.2 Diamagnetismo	382
27.4.3 Materiali in un campo di induzione magnetica e materiali in un campo elettrico	388
27.5 Materiali ferromagnetici	389
27.5.1 Magneti permanenti	389
27.5.2 Magneti quanto permanenti?	391
27.5.3 Ma il ferro è davvero ferromagnetico?	392
27.6 Attrazione — e repulsione — tra magneti	394
28 Equazioni del campo nei mezzi materiali	401
28.1 Correnti microscopiche	401
28.1.1 Corrente microscopica media	403
28.1.2 Correnti microscopiche medie che determinano il campo di induzione magnetica	404
28.2 Il campo magnetico	408
28.2.1 Campo magnetico, campo elettrico	409

28.3	Attraverso il bordo di un mezzo materiale	410
28.3.1	Componenti dei campi	410
28.3.2	La componente normale del campo di induzione magnetica non fa salti	412
28.3.3	Invece la componente normale del campo magnetico può fare salti	413
28.3.4	La componente tangenziale del campo magnetico non fa salti	414
28.3.5	La componente tangenziale del campo di induzione magnetica può fare salti	417
28.3.6	Conclusioni e avvertenze	418
28.4	Come dipende la magnetizzazione dal campo di induzione magnetica e dal campo magnetico?	421
28.4.1	Magnetizzazione e campo di induzione magnetica in materiali diamagnetici o paramagnetici	421
28.4.2	Anche il campo di induzione magnetica e il campo magnetico sono proporzionali	422
28.4.3	La suscettività magnetica	423
28.4.4	Magnetizzazione, campo di induzione magnetica e campo magnetico in materiali ferromagnetici	425
28.4.5	Solenoidi riempiti di materiale magnetizzabile	428
29	Un altro epilogo provvisorio	433
	Campi riuniti: elettromagnetismo	435
30	Punto di arrivo, punto di partenza	437
31	Da dove nascono le forze?	441
31.1	All'origine microscopica delle forze	441
31.2	Forze macroscopiche	442
31.2.1	La forza peso	442
31.2.2	I legami	443
31.2.3	E i magneti?	445
31.2.4	Un ordine tra le interazioni	445
31.3	Forze nei nuclei	447
31.3.1	L'interazione forte	447
31.3.2	L'interazione debole	448
31.4	Perché tante interazioni fondamentali?	449
32	Il tempo e la circuitazione del campo di induzione magnetica	451
32.1	Quando un condensatore si scarica	451
32.1.1	Collegare le facce del condensatore	453
32.1.2	Il condensatore durante la scarica	456
32.1.3	Quanto dura la scarica?	459

32.1.4	Altre quantità che variano	461
32.2	Circuitazione del campo di induzione magnetica e condensatore che si scarica	464
32.2.1	La catastrofe della circuitazione del campo di induzione magnetica	464
32.2.2	Come rimediare alla catastrofe della circuitazione del campo di induzione magnetica	467
32.3	La nuova legge della circuitazione del campo di induzione magnetica	469
32.3.1	Un dubbio da chiarire e la legge del flusso del campo elettrico	470
32.3.2	Una novità importante	474
33	Il tempo e la circuitazione del campo elettrico	477
33.1	Un risultato poco chiaro	477
33.1.1	Ma cosa fa aumentare l'energia?	479
33.2	La nuova legge della circuitazione del campo elettrico	481
33.2.1	Durante la variazione del campo di induzione magnetica	481
33.2.2	Un campo elettrico che aggiusta tutto	484
33.2.3	La nuova legge della circuitazione del campo elettrico e la legge del flusso del campo di induzione magnetica	487
33.2.4	Altre novità	489
34	Le equazioni di Maxwell	491
34.1	Le equazioni del campo elettromagnetico	491
34.1.1	Che tipo di campo è il campo elettromagnetico?	492
34.1.2	Qualche indizio rivelatore	492
34.2	Prima di risolvere le equazioni di Maxwell	494
34.2.1	Campi, sorgenti, curve e superfici	494
34.2.2	Quanto è lungo l'intervallo di tempo Δt ?	495
34.2.3	Le equazioni di Maxwell sono lineari	497
35	Una soluzione delle equazioni di Maxwell	503
35.1	Quando il campo elettrico varia lentamente	503
35.2	Solenoido con corrente che varia nel tempo	504
35.3	Il campo di induzione magnetica quando la corrente non varia velocemente	508
35.4	Il campo elettrico quando la corrente non varia velocemente	509
35.4.1	Il campo elettrico dovuto alla corrente trasversale	510
35.4.2	Il campo elettrico dovuto alla corrente assiale	520
35.4.3	Il componente assiale del campo $\mathbf{E}_{\parallel}(\mathbf{r}, t)$	524
35.4.4	Problemi	530
35.4.5	Dove si chiude la corrente del solenoide?	531
35.4.6	Può fare salti il campo elettrico dovuto alla corrente assiale?	534
35.5	Come il campo del solenoide varia nel tempo	537
35.5.1	Campi e correnti	538

35.5.2	Il campo elettrico varia abbastanza lentamente?	543
35.6	Se ci sono altre sorgenti	544
36	Forza, lavoro, potenziale	547
36.1	Non c'è più il potenziale del campo elettrico	548
36.1.1	Il lavoro della forza dovuta al campo elettrico	550
36.1.2	Quando si può ancora definire il potenziale?	553
36.2	Potenziali del campo elettromagnetico	554
36.2.1	Un numero per ogni curva chiusa	554
36.2.2	Un campo vettoriale ausiliario	555
36.2.3	Un campo con circuitazione nulla	557
36.2.4	Potenziale scalare, potenziale vettore	558
37	La forza elettromotrice	561
37.1	Le esperienze di Faraday	561
37.2	Corrente indotta	563
37.2.1	Un circuito semplice	563
37.2.2	Perplexità	568
37.2.3	Campo elettrico interno al conduttore	571
37.3	Campo elettrico e densità di corrente	574
37.4	Corrente indotta in un circuito qualunque	575
37.4.1	Forza elettromotrice indotta	579
37.5	Il segno nella legge dell'induzione	580
37.5.1	Un principio generale	582
38	Autoinduzione	585
38.1	Induttanza	585
38.1.1	Cosa determina l'induttanza di un circuito	586
38.1.2	L'induttanza di una bobina	587
38.2	Interruttori	589
38.2.1	Corrente dopo la chiusura dell'interruttore	590
38.2.2	E quando si apre l'interruttore?	595
39	Flusso concatenato, flusso tagliato	599
39.1	Circuiti in movimento con il campo di induzione magnetica costante	600
39.1.1	Nomenclatura	601
39.1.2	Cos'è il flusso del campo di induzione magnetica tagliato?	602
39.1.3	Calcolo del flusso del campo di induzione magnetica tagliato	604
39.2	Forza elettromotrice nel circuito in movimento	610
39.2.1	Forza sui portatori di carica in un circuito in movimento	610
39.2.2	Nel circuito in movimento si genera una corrente	613
39.2.3	Anche nel circuito in movimento c'è forza elettromotrice	614
39.3	Circuiti in movimento quando anche il campo di induzione magnetica varia	615

39.4	Una conclusione, una osservazione e un dubbio	617
39.5	Una applicazione ferroviaria	619
40	Corrente alternata	623
40.1	Circuito ruotante	623
40.1.1	Forza elettromotrice nel circuito ruotante	625
40.2	Campo ruotante	627
40.3	E la corrente?	628
40.4	Tensione alternata	632
40.4.1	Caratteristiche della tensione alternata	633
40.4.2	Questioni di fase	636
40.5	Circuiti in corrente alternata	639
40.5.1	Circuito con resistenze soltanto	640
40.5.2	Circuito con resistenza e induttanza	641
40.5.3	E se manca l'induttanza, oppure la resistenza?	645
40.5.4	Circuito con resistenza, induttanza e capacità	646
40.5.5	Pulsazione di risonanza	652
40.5.6	Circuito con la sola capacità	654
40.6	Valori efficaci	655
40.6.1	Serve la media su un periodo?	656
40.6.2	Una quantità efficace	657
40.6.3	Tensione efficace, corrente efficace	659
40.7	Un'osservazione di principio	660
41	Energia del campo elettromagnetico	663
41.1	Come determinare la densità di energia del campo	664
41.2	Lavoro delle forze dovute al campo elettromagnetico	664
41.2.1	Un'altra espressione della densità di corrente	667
41.2.2	Un'altra espressione per il lavoro	672
41.2.3	Ancora un'altra espressione per il lavoro	674
41.2.4	Il contributo inatteso	678
41.3	Dove va l'energia del campo elettromagnetico?	684
41.3.1	La densità di energia	685
41.3.2	Il campo $\mathbf{S}(\mathbf{r}, t)$	685
41.4	Una porzione di spazio qualsiasi	687
41.5	Energia in due dispositivi semplici	690
41.5.1	Energia in un condensatore	690
41.5.2	Energia in una bobina	691
42	Campo elettromagnetico nel vuoto	693
42.1	Il vuoto	693
42.1.1	Le equazioni del campo elettromagnetico nel vuoto	694
42.2	Un campo che varia nel tempo	698

42.2.1	Campo elettrico e campo di induzione magnetica uniformi su ogni piano parallelo	698
42.2.2	Le equazioni del flusso del campo elettrico e del campo di induzione magnetica	701
42.2.3	Curve chiuse e quadratini	704
42.2.4	Le equazioni della circuitazione del campo elettrico e del campo di induzione magnetica	707
42.3	Velocità del campo elettromagnetico	715
43	Onde e luce	719
43.1	Onde elettromagnetiche	719
43.1.1	Un vincolo per il campo elettromagnetico che “viaggia”	720
43.1.2	Il nome per il campo che “viaggia”	725
43.2	Onde piane monocromatiche	727
43.2.1	Cosa distingue un’onda piana monocromatica	728
43.2.2	Legame tra campo elettrico e campo di induzione magnetica in un’onda monocromatica	731
43.2.3	Senza il sistema di assi cartesiani	735
43.2.4	Energia di un’onda piana monocromatica	737
43.2.5	Il flusso d’energia dovuto a un’onda piana monocromatica	739
43.3	Miscugli di onde piane monocromatiche	742
43.4	Luce	745
43.4.1	La velocità della luce	746
43.4.2	Colori	747
43.5	Al di qua e al di là della luce visibile	748
43.5.1	Come si producono le onde e come si rivelano	750
44	Campo elettromagnetico nei materiali	753
44.1	Polarizzazione, magnetizzazione	753
44.1.1	Tempi dei materiali, tempi dei campi	754
44.1.2	La “risposta” del mezzo materiale	758
44.2	Le equazioni di Maxwell in presenza di mezzi materiali	759
44.2.1	Le equazioni di Maxwell dove non compaiono sorgenti	760
44.2.2	L’equazione del flusso del campo elettrico	760
44.2.3	L’equazione della circuitazione del campo di induzione magnetica	762
44.2.4	Densità di corrente microscopica e magnetizzazione	763
44.2.5	Densità di corrente microscopica e polarizzazione	763
44.2.6	Cosa diventa l’equazione della circuitazione del campo di induzione magnetica	768
44.2.7	Le equazioni di Maxwell nei mezzi materiali espresse con le sole sorgenti macroscopiche	769
44.3	Al bordo tra mezzi materiali differenti	772
44.3.1	Campi con componenti normali che non fanno salti e campi con componenti normali che li fanno	773

44.3.2	Per quali campi le componenti tangenziali non fanno salti?	775
44.3.3	Componenti tangenziali che fanno salti	779
44.4	Onde elettromagnetiche nei mezzi materiali	780
44.4.1	Onde in un mezzo omogeneo	780
44.4.2	Frequenza o lunghezza d'onda?	782
44.5	Rifrazione	785
44.5.1	Rifrazione di un'onda elettromagnetica piana	786
44.5.2	Indice di rifrazione e frequenza dell'onda	789
44.5.3	Quando un mezzo non è trasparente	792
45	Epilogo?	795
45.1	Leggere il libro della natura	795
45.1.1	La misteriosa efficacia della matematica	796
45.1.2	Falsificazione e riunificazione	797
45.2	E poi?	798
	Cosa sapere già	801
46	Simboli e significati	803
46.1	Funzione	803
46.2	Elenchi e sommatorie	807
46.2.1	Funzioni con dominio composto di numeri interi	807
46.2.2	Sommatoria	808
46.3	Alcune funzioni reali di variabile reale	809
46.3.1	Numeri reali	809
46.3.2	La funzione esponenziale e la funzione logaritmo	811
46.3.3	Le funzioni seno e coseno	817
46.4	Normale ortogonale perpendicolare	828
46.5	Dimensioni	828
46.5.1	Misura e unità di misura	829
46.5.2	Grandezze fondamentali e grandezze derivate	830
46.5.3	Cosa sono le dimensioni di una grandezza	832
46.5.4	Cambiare unità di misura	832
47	Calcolo con i vettori	837
47.1	Perché <i>vettori</i>	837
47.2	Cos'è un vettore	838
47.2.1	Modulo	842
47.2.2	Versori	843
47.3	Le operazioni fondamentali con i vettori	843
47.3.1	Prodotto di un vettore per un numero reale	844
47.3.2	Addizione di due vettori	847
47.4	Comporre e scomporre vettori	851

47.4.1	Una retta nello spazio	851
47.4.2	Un piano nello spazio	852
47.4.3	Un punto nello spazio	857
47.4.4	Scomporre un vettore	858
47.5	Prodotti di vettori	860
47.5.1	Il prodotto scalare	860
47.5.2	Il prodotto vettoriale	865

Indice analitico**871**