Emilio Doni

Elementi di elettricità
e di magnetismo

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

Edizioni ETS
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

6 Distribuzioni di carica e campo elettrico
   6.1 Campo elettrico dovuto a carica puntiforme
   6.1.1 Significato dei criteri di invarianza
   6.1.2 Criteri di invarianza nel caso di carica puntiforme
   6.1.3 Soluzione dell’equazione del flusso del campo elettrico
   6.2 Una osservazione sulle dimensioni dello spazio
   6.3 L’equazione del flusso del campo elettrico è lineare
   6.4 Campo elettrico di un filo rettilineo carico
      6.4.1 Criteri di invarianza
      6.4.2 Conseguenze dei criteri di invarianza
      6.4.3 Soluzione dell’equazione del flusso del campo elettrico
   6.5 Campo elettrico di una superficie piana carica
      6.5.1 Criteri di invarianza per una superficie piana carica e conseguenze
      6.5.2 Soluzione dell’equazione del flusso del campo elettrico
   6.6 Campo elettrico di una sfera uniformemente carica
      6.6.1 Un problema di meccanica
      6.6.2 Campo elettrico di una superficie sferica uniformemente carica
   6.7 Campo elettrico di altre distribuzioni di carica
      6.7.1 Il campo elettrico di un condensatore

7 La circuitazione del campo elettrico
   7.1 La legge della circuitazione del campo elettrico
   7.2 Il potenziale del campo elettrico
      7.2.1 Definizione del potenziale del campo elettrico
      7.2.2 Alcune proprietà del potenziale del campo elettrico
   7.3 Dal potenziale del campo elettrico alla meccanica
      7.3.1 Lavoro della forza prodotta dal campo elettrico
      7.3.2 Affermazioni equivalenti
      7.3.3 Energia di un portatore di carica in campo elettrico
   7.4 Potenziale e movimenti di un corpo carico
      7.4.1 Regioni dello spazio equipotenziali

8 Il potenziale di alcuni campi elettrici
   8.1 Il potenziale di un campo elettrico uniforme
      8.1.1 Il potenziale di un condensatore
   8.2 Potenziale del campo elettrico di carica puntiforme
      8.2.1 Calcolo di una somma un po’ complicata
   8.3 Potenziale del campo elettrico di un filo carico
      8.3.1 Calcolo di un’altra somma un po’ complicata
   8.4 Potenziale del campo elettrico di una sfera carica
      8.4.1 Calcolo di ancora un’altra somma un po’ complicata
      8.4.2 È possibile che il potenziale faccia un salto?
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 | Circuitti 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 |
## 24 Effetti magnetici con correnti rettilinee

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

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 $B/\mu_0$ .......................... 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
INDICE

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 dia-
       magnetici 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 magneto-
       tico in materiali ferromagnetici ....................................... 425
   28.4.5 Solenoidi riempiti di materiale magnetizzabile .......................... 428

29 Un altro epilogo provvisorio .......................................................... 433

Campi riunificati: 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 magneti-
ca ................................................................. 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 ∆t? ....................... 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 Solenoide con corrente che varia nel tempo ............................. 504
  35.3 Il campo di induzione magnetica quando la corrente non varia veloce-
mente ................................................................. 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 \( \mathbf{E}_0(r, t) \) .................... 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
<table>
<thead>
<tr>
<th>Capitolo</th>
<th>Titolo</th>
<th>Pagine</th>
</tr>
</thead>
<tbody>
<tr>
<td>35.5.2</td>
<td>Il campo elettrico varia abbastanza lentamente?</td>
<td>543</td>
</tr>
<tr>
<td>35.6</td>
<td>Se ci sono altre sorgenti</td>
<td>544</td>
</tr>
<tr>
<td>36</td>
<td>Forza, lavoro, potenziale</td>
<td>547</td>
</tr>
<tr>
<td>36.1</td>
<td>Non c'è più il potenziale del campo elettrico</td>
<td>548</td>
</tr>
<tr>
<td>36.1.1</td>
<td>Il lavoro della forza dovuta al campo elettrico</td>
<td>550</td>
</tr>
<tr>
<td>36.1.2</td>
<td>Quando si può ancora definire il potenziale?</td>
<td>553</td>
</tr>
<tr>
<td>36.2</td>
<td>Potenziali del campo elettromagnetico</td>
<td>554</td>
</tr>
<tr>
<td>36.2.1</td>
<td>Un numero per ogni curva chiusa</td>
<td>554</td>
</tr>
<tr>
<td>36.2.2</td>
<td>Un campo vettoriale ausiliario</td>
<td>555</td>
</tr>
<tr>
<td>36.2.3</td>
<td>Un campo con circuitazione nulla</td>
<td>557</td>
</tr>
<tr>
<td>36.2.4</td>
<td>Potenziale scalare, potenziale vettore</td>
<td>558</td>
</tr>
<tr>
<td>37</td>
<td>La forza elettromotrice</td>
<td>561</td>
</tr>
<tr>
<td>37.1</td>
<td>Le esperienze di Faraday</td>
<td>561</td>
</tr>
<tr>
<td>37.2</td>
<td>Corrente indotta</td>
<td>563</td>
</tr>
<tr>
<td>37.2.1</td>
<td>Un circuito semplice</td>
<td>563</td>
</tr>
<tr>
<td>37.2.2</td>
<td>Perplessità</td>
<td>568</td>
</tr>
<tr>
<td>37.2.3</td>
<td>Campo elettrico interno al conduttore</td>
<td>571</td>
</tr>
<tr>
<td>37.3</td>
<td>Campo elettrico e densità di corrente</td>
<td>574</td>
</tr>
<tr>
<td>37.4</td>
<td>Corrente indotta in un circuito qualunque</td>
<td>575</td>
</tr>
<tr>
<td>37.4.1</td>
<td>Forza elettromotrice indotta</td>
<td>579</td>
</tr>
<tr>
<td>37.5</td>
<td>Il segno nella legge dell'induzione</td>
<td>580</td>
</tr>
<tr>
<td>37.5.1</td>
<td>Un principio generale</td>
<td>582</td>
</tr>
<tr>
<td>38</td>
<td>Autoinduzione</td>
<td>585</td>
</tr>
<tr>
<td>38.1</td>
<td>Induttanza</td>
<td>585</td>
</tr>
<tr>
<td>38.1.1</td>
<td>Cosa determina l'induttanza di un circuito</td>
<td>586</td>
</tr>
<tr>
<td>38.1.2</td>
<td>L'induttanza di una bobina</td>
<td>587</td>
</tr>
<tr>
<td>38.2</td>
<td>Interruttori</td>
<td>589</td>
</tr>
<tr>
<td>38.2.1</td>
<td>Corrente dopo la chiusura dell'interruttore</td>
<td>590</td>
</tr>
<tr>
<td>38.2.2</td>
<td>E quando si apre l'interruttore?</td>
<td>595</td>
</tr>
<tr>
<td>39</td>
<td>Flusso concatenato, flusso tagliato</td>
<td>599</td>
</tr>
<tr>
<td>39.1</td>
<td>Circuits in movement con il campo di induzione magnetica costante</td>
<td>600</td>
</tr>
<tr>
<td>39.1.1</td>
<td>Nomenclature</td>
<td>601</td>
</tr>
<tr>
<td>39.1.2</td>
<td>Cos'è il flusso del campo di induzione magnetica tagliato?</td>
<td>602</td>
</tr>
<tr>
<td>39.1.3</td>
<td>Calcolo del flusso del campo di induzione magnetica tagliato</td>
<td>604</td>
</tr>
<tr>
<td>39.2</td>
<td>Forza elettromotrice nel circuito in movimento</td>
<td>610</td>
</tr>
<tr>
<td>39.2.1</td>
<td>Forza sui portatori di carica in un circuito in movimento</td>
<td>610</td>
</tr>
<tr>
<td>39.2.2</td>
<td>Nel circuito in movimento si genera una corrente</td>
<td>613</td>
</tr>
<tr>
<td>39.2.3</td>
<td>Anche nel circuito in movimento c'è forza elettromotrice</td>
<td>614</td>
</tr>
<tr>
<td>39.3</td>
<td>Circuits in movement quando anche il campo di induzione magnetica varia</td>
<td>615</td>
</tr>
</tbody>
</table>
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 $\mathbf{S}(r, t)$ .............................................................. 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
INDICE

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 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 837
47.2 Cos’è un vettore . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 838
47.2.1 Modulo . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 842
47.2.2 Versorí . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 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
INDICE

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