

**EDOARDO
AMALDI**

**ROMANO
BIZZARRI**

**GUIDO
PIZZELLA**

FISICA GENERALE

ELETTROMAGNETISMO RELATIVITÀ OTTICA

0001310

AMALDI, PIZZELLA

BIZZARRI

FISICA GENERALE

RISTAMPATA

ZANICHELLI

ZANICHELLI EDITORE

Indice

Prefazione

1. Il campo elettromagnetico, le variabili spazio-temporali e il sistema di riferimento.

- 1 1.1 Le interazioni fondamentali.
- 1 1.2 Il concetto di campo e la sua propagazione nello spazio.
- 2 1.3 Proprietà generali dello spazio-tempo: continuità, omogeneità e isotropia.
- 3 1.4 I sistemi di riferimento.
- 4 1.5 Scalari, vettori, tensori.
- 7 1.6 Le unità di misura.

2. Complementi di calcolo vettoriale.

- 9 2.1 Campi scalari e superficie di livello.
- 11 2.2 Campi vettoriali e linee di flusso.
- 13 2.3 Derivata di una grandezza scalare rispetto a una direzione.
- 16 2.4 Campi conservativi.
- 17 2.5 Flusso di un vettore attraverso una superficie.
- 21 2.6 Teorema della divergenza.
- 22 2.7 Campi solenoidali.
- 23 2.8 Campi conservativi e solenoidali.
- 28 2.9 Circuitazione di un vettore. Rotazione.
- 29 2.10 Qualche precisazione sul concetto di campo.
- 29 2.10 Operatori.

3. Il campo elettrostatico nel vuoto.

- 33 3.1. Alcuni fatti sperimentali.
- 34 3.2 L'elettroscopio a foglie.
- 35 3.3 La carica elettrica o quantità di elettricità.
- 36 3.4 Legge di Coulomb.
- 38 3.5 Unità di misura della carica elettrica.
- 39 3.6 Il campo elettrico.
- 41 3.7 Il potenziale elettrostatico. Caso del campo generato da una carica puntiforme.
- 43 3.8 Campo elettrico e potenziale elettrostatico generato da più cariche puntiformi.
- 44 3.9 Potenziale generato da distribuzioni continue di carica.
- 46 3.10 Linee di flusso e superficie equipotenziali del campo elettrico.
- 47 3.11 Il flusso del campo elettrico, il teorema di Gauss.
- 50 3.12 Le equazioni fondamentali del campo elettrostatico e la loro soluzione.
- 51 3.13 Potenziale e campo di uno strato.
- 53 3.14 Potenziale di un doppio strato.
- 54 3.15 Campo elettrico generato da distribuzioni di cariche aventi simmetria sferica.
- 54 3.16 Il dipolo elettrico.
- 56 3.17 Il momento elettrico di dipolo di un sistema di cariche.
- 58 3.18 Il momento elettrico di quadrupolo.
- 59 3.19 Energia di un dipolo in un campo elettrico esterno.
- 60 3.20 Distribuzione statica delle cariche nei conduttori.
- 62 3.21 L'induzione elettrostatica.

- 63 3.22 Il campo elettrico in un punto prossimo alla superficie di un conduttore. Il teorema di Coulomb.
- 65 3.23 Critica della definizione del vettore E_0 .
- 66 3.24 Il problema generale della elettrostatica.
- 67 3.25 Lo schermo elettrostatico.
- 69 3.26 Significato della espressione "mettere a terra".
- 69 3.27 Capacità di un conduttore.
- 70 3.28 Caso di più conduttori.
- 72 3.29 I condensatori.
- 75 3.30 Energia elettrostatica di un condensatore.
- 76 3.31 Energia potenziale elettrostatica di un sistema di cariche.
- 78 3.32 L'elettroscopio usato come misuratore di differenze di potenziale. L'elettroscopio condensatore di Volta.
- 79 3.33 Forze tra conduttori carichi; l'elettrometro.
- 84 3.34 I generatori elettrostatici.
- 88 3.35 Il vettore induzione dielettrica D_0 .
- 89 3.36 Definizione operativa del vettore D_0 .

4. I dielettrici.

- 91 4.1 La polarizzazione di un dielettrico e la costante dielettrica.
- 92 4.2 La legge di Coulomb di un dielettrico omogeneo e isotropo.
- 93 4.3 Difficoltà di una definizione operativa del campo elettrico.
- 94 4.4 L'atomo.
- 95 4.5 L'atomo di Rutherford, un modello classico.
- 98 4.6 Stati quantici.
- 101 4.7 Modelli semiclassici dell'atomo.
- 102 4.8 Le molecole.
- 105 4.9 Il campo elettrico in un dielettrico.
- 108 4.10 Il momento elettrico delle molecole.

Trattazione macroscopica dei dielettrici.

- 110 4.11 Il vettore intensità di polarizzazione P .
- 113 4.12 Il vettore induzione dielettrica D .
- 115 4.13 Polarizzazione molecolare e costante dielettrica.
- 116 4.14 Confronto fra il campo elettrico nel vuoto e nei dielettrici omogenei.
- 118 4.15 Discussione del campo generato da una carica puntiforme entro un dielettrico.
- 120 4.16 Passaggio da un dielettrico a un altro. Condizioni ai limiti per i vettori E e D .
- 121 4.17 Definizione operativa dei vettori E e D e della costante dielettrica relativa ϵ_r .
- 122 4.18 Condensatore piano con due dielettrici. Rigidità dielettrica.
- 126 4.19 Misura della costante dielettrica relativa ϵ_r .

Trattazione microscopica dei dielettrici.

- 129 4.20 Polarizzabilità elettronica di un gas.
- 131 4.21 Polarizzabilità per orientamento di un gas.
- 134 4.22 La costante dielettrica dei liquidi. Il campo locale.

- 137 4.23 Polarizzabilità dei solidi. La suscettività dielettrica come tensore.
 139 4.24 Polarizzazione spontanea. Piroelettricità. Ferroeletricità.
 140 4.25 Piezoelettricità.

5. La corrente elettrica stazionaria e i fenomeni connessi con la conduzione.

- 141 5.1 La intensità della corrente elettrica e la densità di corrente.
 143 5.2 L'equazione di continuità e la legge di conservazione della carica elettrica. Il caso della corrente stazionaria.
 144 5.3 La legge di Ohm. La resistenza elettrica.
 146 5.4 I superconduttori.
 147 5.5 Formulazione locale della legge di Ohm. Caso dei conduttori in serie.
 148 5.6 Il meccanismo della corrente elettrica nei metalli dal punto di vista microscopico.
 153 5.7 Il gas degli elettroni di conduzione nel metallo. La distribuzione di Fermi.
 155 5.8 Generatore elettrico. Forza elettromotrice. Estensione della legge di Ohm.
 159 5.9 La legge di Joule.
 160 5.10 Le leggi di Kirchhoff.
 162 5.11 Circuiti derivati. Strumenti di misura. Shunt.
 165 5.12 Misura della resistenza.
 166 5.13 Il potenziale di estrazione degli elettroni dai metalli e l'effetto termoionico.
 169 5.14 Diodi. Triodi.
 173 5.15 L'effetto fotoelettrico. Le celle fotoelettriche.
 175 5.16 Effetto Volta.
 176 5.17 Effetti termoelettrici.
 178 5.18 L'effetto Josephson e gli SQUID.
 180 5.19 Il passaggio dell'elettricità nei liquidi.
 5.19.1 La dissociazione delle molecole degli elettroliti.
 5.19.2 La pressione osmotica e le leggi di Van t'Hoff.
 5.19.3 L'elettrolisi.
 5.19.4 Alcune applicazioni dell'elettrolisi.
 188 5.20 La pila.
 192 5.21 L'accumulatore.
 193 5.22 Il passaggio dell'elettricità nel gas.
 5.22.1 Gli agenti ionizzanti.
 5.22.2 I principali fenomeni che si svolgono in un gas ionizzato.
 5.22.3 Il passaggio della corrente in un gas.
 5.22.4 Esempi di scarica in un gas.

6. Il campo magnetico costante nel vuoto.

- 207 6.1 Alcuni fatti sperimentali.
 208 6.2 Magneti e circuiti elettrici.
 209 6.3 Le linee di flusso del campo magnetico.
 210 6.4 Forza esercitata da un campo magnetico su un circuito percorso da corrente. Il vettore di induzione magnetica $\mathbf{B}$.
 212 6.5 Interpretazione atomica delle forze esercitate da un campo magnetico su di un circuito percorso da corrente: la forza di Lorentz.

- 213 6.6 Misura diretta della forza di Lorentz con l'oscillografo catodico. Il moto delle cariche elettriche libere in un campo magnetico.
 216 6.7 La legge di Biot e Savart e la prima formula di Laplace.
 218 6.8 Il campo magnetico generato da una carica elettrica in moto.
 219 6.9 Alcune semplici applicazioni della prima formula di Laplace.
 223 6.10 Forze agenti fra due circuiti: elettrodinamica. Definizione di ampere.
 225 6.11 Il flusso dell'induzione magnetica. La divergenza del vettore $\mathbf{B}$.
 226 6.12 La circuitazione del vettore induzione magnetica $\mathbf{B}$.
 229 6.13 Il vettore intensità del campo magnetico $\mathbf{H}$.
 230 6.14 Misura del vettore intensità del campo magnetico $\mathbf{H}$. Momento magnetico di un ago magnetico.
 231 6.15 Confronto fra il Sistema Internazionale e il Sistema Elettromagnetico di Unità.
 232 6.16 Considerazioni sull'esistenza di un potenziale magnetico.
 234 6.17 Il potenziale vettore.
 235 6.18 Calcolo del potenziale vettore. Un esempio importante.
 238 6.19 La circuitazione del potenziale vettore.
 239 6.20 Il teorema di equivalenza di Ampère.
 6.20.1 Azioni meccaniche esercitate da un campo magnetico su di una spira o su un ago magnetico.
 6.20.2 Campo magnetico generato da una spira e da un ago magnetico.
 242 6.21 La bussola delle tangenti e gli strumenti ad ago mobile.
 243 6.22 Gli strumenti a bobina mobile.

7. Le proprietà magnetiche della materia.

- 245 7.1 La permeabilità magnetica relativa.
 246 7.2 La polarizzazione magnetica.
 247 7.3 Sostanze diamagnetiche, paramagnetiche e ferromagnetiche.
 7.3.1 Sostanze diamagnetiche.
 7.3.2 Sostanze paramagnetiche.
 7.3.3 Sostanze ferromagnetiche.
 248 7.4 Difficoltà di una definizione operativa del vettore induzione magnetica $\mathbf{B}$ nella materia.
 249 7.5 Correnti atomiche e momento magnetico di un atomo.
 251 7.6 Il teorema di Larmor.
 253 7.7 La polarizzazione delle molecole in un campo magnetico esterno.
 255 7.8 Il vettore induzione magnetica $\mathbf{B}$ entro la materia.
 257 7.9 Il vettore intensità di magnetizzazione $\mathbf{M}$.
 260 7.10 Il vettore intensità del campo magnetico $\mathbf{H}$.
 261 7.11 Passaggio da un mezzo ad un altro. Condizioni ai limiti per i vettori $\mathbf{B}$ ed $\mathbf{H}$.
 262 7.12 Le proprietà magnetiche della materia.
 7.12.1 Le sostanze diamagnetiche.
 7.12.2 Le sostanze paramagnetiche.
 7.12.3 Le sostanze ferromagnetiche.
 272 7.13 Il calcolo dei vettori $\mathbf{B}$ ed $\mathbf{H}$.

- 275 7.14 Confronto fra le proprietà dei vettori **B**, **H**, **M** e i vettori **D**, **E**, **P**.
 276 7.15 Il concetto di circuito magnetico.
 280 7.16 I magneti permanenti.
 283 7.17 I poli magnetici.
 284 7.18 Confronto fra le forze agenti fra corrente e corrente, corrente e polo, polo e polo.
 285 7.19 Dimostrazione rigorosa della formula 7.74

8. Campi elettrici e magnetici lentamente variabili.

- 287 8.1 Fenomeni periodici e teorema di Fourier.
 289 8.2 Le correnti indotte e la legge di Faraday-Neumann.
 291 8.3 Sul significato della f.e.m. indotta. Il campo elettrico nei casi non stazionari.
 294 8.4 I due casi di f.e.m. indotta: $d\phi(\mathbf{B})$ — flusso tagliato; $d\phi(\mathbf{B})$ — variazione del flusso concatenato.
 295 8.5 Misura dell'induzione magnetica **B**.
 296 8.6 Il fenomeno dell'autoinduzione.
 302 8.7 L'energia del campo magnetico.
 305 8.8 Energia assorbita da un mezzo sottoposto ad un campo magnetico variabile.
 307 8.9 Le correnti alternate.
 308 8.10 Il metodo simbolico.
 311 8.11 Misura delle correnti alternate. Grandezze efficaci e formula di Galileo Ferraris.
 316 8.12 Induzione mutua. Trasformatore statico.
 319 8.13 Generatori di corrente. Alternatori e dinamo.
 323 8.14 Motori elettrici.
 326 8.15 Il telefono.
 327 8.16 Oscillazioni elettriche. Risonanza.
 334 8.17 Realizzazione pratica di oscillazioni elettriche persistenti.

9. Campi elettrici e magnetici rapidamente variabili. Onde elettromagnetiche.

- 336 9.1 Corrente di spostamento.
 339 9.2 Le equazioni di Maxwell.
 343 9.3 Il caso delle onde piane.
 9.3.1 Le equazioni di Maxwell nel caso delle onde piane.
 9.3.2 Caso delle onde piane polarizzate linearmente.
 9.3.3 Caso delle onde piane polarizzate linearmente e sinusoidali.
 9.3.4 Trasporto dell'energia da parte di una onda piana.
 349 9.4 Impulso delle onde elettromagnetiche.
 350 9.5 Conservazione dell'energia e vettore di Poynting.
 352 9.6 Quantità di moto del campo elettromagnetico. Il tensore degli sforzi di Maxwell.
 354 9.7 La pressione di radiazione.
 356 9.8 Dalle equazioni di Maxwell alle equazioni di propagazione del potenziale vettore **A** e del potenziale scalare **V**.
 358 9.9 Invarianza di ricalibratura.
 360 9.10 Le onde piane trattate con i potenziali vettore e scalare.
 361 9.11 Onde sferiche e soluzione generale delle equazioni di Maxwell.

- 364 9.12 Campo elettromagnetico generato da un dipolo oscillante.
 368 9.13 Formule di Lienard e di Larmor. Irraggiamento di una antenna.
 369 9.14 Onde sferiche e onde piane.

10. Relatività ristretta.

- 371 10.1 Le trasformazioni di Galileo.
 373 10.2 La velocità della luce in diversi riferimenti.
 374 10.3 Alcune precisazioni relative alle misure di spazio e di tempo. Eventi puntuali.
 375 10.4 Il principio di relatività di Einstein e le trasformazioni di Lorentz. L'effetto Doppler.
 381 10.5 La legge di composizione delle velocità.
 382 10.6 Contrazione delle lunghezze e dilatazione del tempo. Tempo proprio.
 385 10.7 Linee di universo e orologio di luce.
 387 10.8 Rilevanza della simultaneità di due eventi puntuali. Intervallo fra due eventi puntuali.
 390 10.9 I quadrivettori.
 392 10.10 I tensori.
 393 10.11 Definizione relativistica di quantità di moto ed energia. L'effetto Compton.
 399 10.12 Inerzia dell'energia.
 400 10.13 Equazioni relativistiche del moto.
 401 10.14 La quadricorrente e il quadripotenziale.
 403 10.15 Il tensore campo elettromagnetico e le equazioni di Maxwell in forma covariante.
 404 10.16 Le equazioni del moto di una carica elettrica.
 405 10.17 La forza per unità di volume e il tensore energia impulso del campo elettromagnetico.

11. Cenni sui sistemi di unità di misura.

- 407 11.1 Sistemi di unità.
 407 11.2 Formule classiche e formule razionalizzate.
 410 11.3 Il Sistema Internazionale di Unità.
 410 11.4 Sistema C.G.S. elettrostatico.
 411 11.5 Sistema C.G.S. elettromagnetico.
 411 11.6 Sistema di unità di misura di Gauss.
 412 11.7 Evoluzione, nel passato e nel prossimo futuro, delle definizioni delle unità di base del SI.

12. La luce.

- 417 12.1 La velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche.
 419 12.2 Costante dielettrica e indice di rifrazione.
 424 12.3 Dipendenza della polarizzabilità della frequenza.
 427 12.4 La dispersione della luce e la sua utilizzazione nello spettroscopio.
 430 12.5 La diffusione della luce.
 431 12.6 La propagazione delle onde elettromagnetiche nei conduttori.
 433 12.7 Pacchetti d'onda. Velocità di gruppo.
 437 12.8 L'emissione e l'assorbimento della luce.
 441 12.9 L'emissione e l'assorbimento dei raggi X.
 444 12.10 Sorgenti laser.
 448 12.11 Interferenza della luce.
 450 12.12 La polarizzazione della luce.
 452 12.13 Intensità dell'onda riflessa e dell'onda rifratta. Formula di Brewster.

13. L'ottica geometrica.

- 455 13.1 Il problema generale dell'ottica e l'approssimazione dell'ottica geometrica.
 457 13.2 Lo specchio piano. Sorgente puntiforme in un mezzo rifrangente.
 458 13.3 Il prisma.
 460 13.4 Il diotro e lo specchio sferico.
 465 13.5 I sistemi ottici centrati.
 468 13.6 I punti cardinali.
 471 13.7 Pupilla di entrata e di uscita. Lo splendore della sorgente e della immagine.
 473 13.8 Lenti spesse e lenti sottili.
 476 13.9 Le aberrazioni.
 478 13.10 Il principio di Fermat.

14. Interferenza.

- 483 14.1 Sorgenti coerenti di luce. Specchi di Fresnel.
 487 14.2 Frange localizzate. Anelli di Newton.
 488 14.3 Interferometro di Michelson.
 489 14.4 L'esperienza di Michelson-Morley.
 491 14.5 L'olografia.

15. La diffrazione.

- 492 15.1 La diffrazione. Il principio di Huyghens-Fresnel e la formula di Kirchhoff.

- 496 15.2 Applicazione della formula di Kirchhoff allo studio dei fenomeni di diffrazione. Fenomeni di Fraunhofer.
 499 15.3 Diffrazione di Fraunhofer da una apertura rettangolare e da una fenditura.
 501 15.4 Il reticolo di diffrazione.
 503 15.5 Reticoli cristallini e diffrazione dei raggi X.
 506 15.6 Potere risolutivo di uno strumento ottico ideale.
 507 15.7 Profondità di fuoco di uno strumento ottico ideale.
 510 15.8 L'occhio umano.
 511 15.9 Strumenti semplici. Obbiettivi. Oculari.
 513 15.10 Strumenti composti. Cannocchiale. Microscopio.

16. I fondamenti dell'ottica dei corpi anisotropi.

- 516 16.1 Varii casi di anisotropia della materia.
 517 16.2 L'ellissoide degli indici.
 520 16.3 L'esempio della calcite.
 522 16.4 Il prisma di Nicol e la lamina a quarto d'onda.
 523 16.5 La birifrangenza artificiale.
 526 16.6 Il potere rotatorio.
 528 16.7 Effetto Faraday.

530 Indice analitico