

SCIENCES SUP

Cours et exercices corrigés

1^{er} Cycle • Licence • IUT • Prépas

PHYSIQUE GÉNÉRALE

2. Champs et ondes

2^e édition

Marcelo Alonso
Edward J. Finn

DUNOD

TABLE DES MATIÈRES

Préface de la deuxième édition xv

Préface des traducteurs xix

Note à l'usage de l'étudiant xi

DEUXIÈME PARTIE LE CHAMP MAGNÉTIQUE

Chapitre 1 Interaction électrique

- 1.1 Introduction 6 □ 1.2 La charge électrique 7 □ 1.3 La loi de Coulomb 8 □ 1.4 Champ électrique 11 □ 1.5 La quantification de la charge électrique 18 □ 1.6 Potentiel électrique 20 □ 1.7 Potentiel électrique d'une charge ponctuelle 23 □ 1.8 Relations énergétiques dans un champ électrique 26 □ 1.9 Courant électrique 28 □ 1.10 Dipôle électrique 29 □ 1.11 Multipôles électriques d'ordre supérieur 37

Chapitre 2 Le champ électrostatique

- 2.1 Introduction 52 □ 2.2 Flux d'un champ de vecteurs 52 □ 2.3 Le théorème de Gauss pour le champ électrique 54 □ 2.4 Forme différentielle du théorème de Gauss 60 □ 2.5 Polarisation de la matière 65 □ 2.6 Le déplacement électrique 68 □ 2.7 Calcul de la susceptibilité électrique 71 □ 2.8 Capacité électrique; condensateurs 78 □ 2.9 L'énergie du champ électrique 81

Chapitre 3 Circuits électriques

3.1 Introduction 94 □ 3.2 Conductivité électrique; loi d'Ohm 94 □ 3.3 Origine de la résistance électrique 97 □ 3.4 L'effet Joule 99 □ 3.5 Conducteurs, isolants et semi-conducteurs 101 □ 3.6 Force électromotrice 106 □ 3.7 Conducteurs non ohmiques 111

Chapitre 4 L'interaction magnétique

4.1 Introduction 120 □ 4.2 Force magnétique s'exerçant sur une charge en mouvement 121 □ 4.3 Mouvement d'une charge dans un champ magnétique 125 □ 4.4 Exemples de mouvements de particules chargées dans un champ magnétique 132 □ 4.5 Champ magnétique d'une charge en mouvement (approximation non-relativiste) 139 □ 4.6 L'électromagnétisme et le principe de relativité 141 □ 4.7 Le champ électromagnétique d'une charge en mouvement (approximation relativiste) 144 □ 4.8 Interaction électromagnétique entre deux charges en mouvement 147

Chapitre 5 Champs magnétiques et courants électriques

5.1 Introduction 164 □ 5.2 Force magnétique agissant sur un courant électrique 164 □ 5.3 Couple magnétique agissant sur un courant électrique fermé 166 □ 5.4 Champ magnétique produit par une boucle de courant 169 □ 5.5 Champ magnétique d'un courant rectiligne 171 □ 5.6 Forces s'exerçant entre les courants 174 □ 5.7 Remarque sur les unités du système international 175 □ 5.8 Champ magnétique d'un courant circulaire 177

Chapitre 6 Le champ magnétique statique

6.1 Introduction 190 □ 6.2 Théorème d'Ampère pour le champ magnétique 190 □ 6.3 Forme différentielle du théorème d'Ampère 195 □ 6.4 Flux magnétique 197 □ 6.5 Aimantation de la matière 198 □ 6.6 Le champ magnétisant 200 □ 6.7 Calcul de la susceptibilité magnétique 202 □ 6.8 Résumé des lois relatives aux champs statiques 207

Chapitre 7 Structure électrique de la matière

7.1 Introduction 214 □ 7.2 Interactions électriques dans les atomes et les molécules 214 □ 7.3 Structure des atomes

- 217 □ 7.4 Niveaux d'énergie électriques; la théorie de Bohr
 225 □ 7.5 Moment dipolaire magnétique créé par le mouvement orbital d'une particule chargée 230 □ 7.6 Energie et couple auquel est soumise une particule chargée se déplaçant dans un champ magnétique; quantification de l'espace 232

Chapitre 8 Le champ électromagnétique dépendant du temps

- 8.1 Introduction 242 □ 8.2 La loi de Faraday-Henry 242 □ 8.3 Le bêtatron 246 □ 8.4 Induction électromagnétique due au mouvement relatif d'un conducteur et d'un champ magnétique 249 □ 8.5 L'induction électromagnétique et le principe de relativité 251 □ 8.6 Potentiel électrique et induction électromagnétique 252 □ 8.7 Forme différentielle de la loi de Faraday-Henry 253 □ 8.8 Le principe de conservation de la charge 255 □ 8.9 La loi d'Ampère-Maxwell 257 □ 8.10 Forme différentielle de la loi d'Ampère-Maxwell 260 □ 8.11 Les équations de Maxwell 262

Chapitre 9 Circuits électriques en régime non stationnaire

- 9.1 Introduction 274 □ 9.2 Auto-induction 274 □ 9.3 L'énergie du champ magnétique 279 □ 9.4 Oscillations électriques libres dans un circuit 282 □ 9.5 Oscillations électriques forcées dans un circuit 284 □ 9.6 Circuits couplés 289 □ 9.7 Remarques finales 292

TROISIEME PARTIE ONDES

Chapitre 10 Mouvements ondulatoires: ondes élastiques

- 10.1 Introduction 302 □ 10.2 Description mathématique de la propagation 303 □ 10.3 Analyse de Fourier d'un mouvement ondulatoire 307 □ 10.4 Equation différentielle du mouvement ondulatoire 311 □ 10.5 Ondes élastiques dans un barreau solide 313 □ 10.6 Ondes de pression dans une colonne gazeuse 318 □ Ondes transversales sur une corde 323 □ 10.8 Ondes à la surface d'un liquide 327 □ 10.9 Ce qui se propage dans un mouvement ondulatoire 331 □ 10.10 Vitesse de groupe 335 □ 10.11 L'effet Doppler 338 □ 10.12 Ondes à deux et trois dimensions 341 □ 10.13 Ondes sphériques dans un fluide 346

Chapitre 11 Les ondes électromagnétiques

11.1 Introduction 358 □ 11.2 Ondes électromagnétiques planes 358 □ 11.3 Energie et quantité de mouvement d'une onde électromagnétique 363 □ 11.4 Rayonnement d'un dipôle électrique oscillant 367 □ 11.5 Rayonnement d'un dipôle magnétique oscillant 373 □ 11.6 Rayonnement de multipôles oscillants d'ordre supérieur 376 □ 11.7 Rayonnement d'une charge accélérée 377

Chapitre 12 Interaction du rayonnement électromagnétique avec la matière

12.1 Introduction 390 □ 12.2 L'absorption du rayonnement électromagnétique 390 □ 12.3 Diffusion des ondes électromagnétiques par les électrons liés 392 □ 12.4 Diffusion du rayonnement électromagnétique par un électron libre; l'effet Compton 394 □ 12.5 Les photons 399 □ 12.6 Compléments sur les photons; l'effet photoélectrique 404 □ 12.7 Propagation des ondes électromagnétiques dans un milieu matériel; la dispersion 406 □ 12.8 L'effet Doppler pour les ondes électromagnétiques 410 □ 12.9 Le spectre du rayonnement électromagnétique 416

Chapitre 13 Réflexion et réfraction

13.1 Introduction 428 □ 13.2 Le principe d'Huygens 428 □ 13.3 Le théorème de Malus 431 □ 13.4 Réflexion et réfraction des ondes planes 432 □ 13.5 Réflexion et réfraction des ondes sphériques 438 □ 13.6 Compléments sur les lois de la réflexion et de la réfraction 440 □ 13.7 Réflexion et réfraction sur des surfaces métalliques 445 □ 13.8 Propagation dans un milieu non homogène; principe de Fermat 447

Chapitre 14 Réflexion et réfraction des ondes électromagnétiques. Polarisation

14.1 Introduction 454 □ 14.2 Réflexion et réfraction des ondes électromagnétiques 454 □ 14.3 Propagation des ondes électromagnétiques dans un milieu anisotrope 459 □ 14.4 Dichroïsme 466 □ 14.5 La double réfraction 467 □ 14.6 L'activité optique 473

Chapitre 15 L'optique géométrique

15.1 Introduction 484 □ 15.2 Réflexion sur une surface sphérique 484 □ 15.3 Réfraction sur un dioptré sphérique

- 495 □ 15.4 Les lentilles 501 □ 15.5 Le microscope
 507 □ 15.6 Le télescope 509 □ 15.7 Le prisme 511 □
 15.8 La dispersion 512 □ 15.9 Les aberrations chromatiques 515

Chapitre 16 Les interférences

- 16.1 Introduction 528 □ 16.2 Interférence des ondes produites
 par deux sources synchrones 528 □ 16.3 Interférence de plusieurs
 sources synchrones 535 □ 16.4 Ondes stationnaires à une
 dimension 541 □ 16.5 Les ondes stationnaires et l'équation
 d'onde 544 □ 16.6 Ondes électromagnétiques stationnaires
 550 □ 16.7 Ondes stationnaires à deux dimensions
 553 □ 16.8 Ondes stationnaires à trois dimensions; les cavités
 résonnantes 559 □ 16.9 Les guides d'onde 561

Chapitre 17 Diffraction

- 17.1 Introduction 578 □ 17.2 Diffraction de Fraunhofer par une
 fente rectangulaire 579 □ 17.3 Diffraction de Fraunhofer par
 une ouverture circulaire 585 □ 17.4 Diffraction de Fraunhofer
 par deux fentes parallèles identiques 587 □ 17.5 Réseaux de
 diffraction 590 □ 17.6 Diffraction de Fresnel 595 □ 17.7 La
 diffusion 601 □ 17.8 Diffusion des rayons X par les cristaux 601

Chapitre 18 La mécanique quantique

- 18.1 Introduction 614 □ 18.2 Particules et champs
 615 □ 18.3 Diffusion des particules par les cristaux 616 □
 18.4 Particules et paquets d'onde 619 □ 18.5 Le principe
 d'incertitude d'Heisenberg pour la position et la quantité de
 mouvement 621 □ 18.6 Illustrations du principe d'Heisenberg
 622 □ 18.7 La relation d'incertitude pour le temps et l'énergie
 624 □ 18.8 Etats stationnaires et champ associé à la matière
 625 □ 18.9 Fonction d'onde et densité de probabilité
 628 □ 18.10 L'équation de Schrödinger 631 □ 18.11 Fonction
 d'onde d'une particule libre 632 □ 18.12 Fonction d'onde d'une
 particule dans une boîte 633 □ 18.13 Fonction d'onde de
 l'oscillateur harmonique à un degré de liberté
 635 □ 18.14 L'atome d'hydrogène 637

Appendice: Formules et tables mathématiques 643

Réponses aux exercices 655

Index 671

SCIENCES SUP

Marcelo Alonso • Edward J. Finn
Texte français de Gilbert Weill

PHYSIQUE GÉNÉRALE

2. Champs et ondes

La physique est une science fondamentale qui a une profonde influence sur toutes les autres sciences. Les futurs physiciens et les futurs ingénieurs ne sont pas les seuls qui doivent avoir parfaitement compris ces idées fondamentales. Tous ceux qui envisagent une carrière scientifique (y compris les étudiants qui se spécialisent en biologie, en chimie et en mathématiques), doivent avoir acquis la même compréhension.

Le but premier du cours de physique générale est de donner à l'étudiant une vue unifiée de la physique. Ce cours en deux tomes présente donc les idées fondamentales constituant l'essentiel de la physique contemporaine.

Il s'adresse aux étudiants de premier cycle, des classes préparatoires aux grandes écoles et des IUT scientifiques. Il sera aussi utilisé avec profit par les enseignants du secondaire désireux de se recycler.

Le premier tome présente, outre la mécanique classique, une introduction à la thermodynamique et à la mécanique statistique.

Ce deuxième volume étudie les phénomènes d'interaction, et donc de champs. L'électromagnétisme est couvert très en détail ; l'ouvrage se termine par une introduction à la mécanique quantique.

Ces deux tomes proposent de très nombreux exercices, tous corrigés.



2^e édition

MARCELO ALONSO appartient au Département des Affaires scientifiques de l'Organisation des États américains.

EDWARD J. FINN est professeur à l'université de Georgetown.

MATHÉMATIQUES

PHYSIQUE

CHIMIE

SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

INFORMATIQUE

SCIENCES DE LA VIE

SCIENCES DE LA TERRE



ISBN 2 10 049478 3



www.dunod.com

