

T. Bécherrawy

Optique géométrique

**COURS ET
134 EXERCICES CORRIGÉS**

Licence de physique,
L1 et L2



de boeck

LMD
L

530-34.1

Avant-Propos

Le but de cet ouvrage est d'étudier l'optique géométrique au niveau de la première année de licence et des classes préparatoires aux Grandes Ecoles ainsi que la préparation des concours de CAPES et de l'Agrégation. L'optique géométrique est un outil indispensable dans certains domaines de la physique comme la spectroscopie, l'astronomie, la conception des instruments d'optique, etc. Il n'est guère de science ou de technique qui ne fasse pas appel aux instruments d'optique pour l'observation, les mesures, l'analyse spectrale, la reproduction et la transmission...

J'ai inclus des notes historiques, pour illustrer le développement de l'optique, la vie des grands physiciens ou leur opinion sur certaines questions. Je considère que cela est pédagogiquement utile.

L'optique géométrique ne présente pas de difficultés mathématiques majeures car elle n'utilise que des éléments simples de géométrie et de trigonométrie. J'ai essayé d'utiliser dans ce texte une notation cohérente et qui évite la confusion. Ainsi, la fréquence d'une onde est désignée par N au lieu de la lettre grecque ν , pour éviter sa confusion avec la vitesse v , ou la lettre f , réservée à la distance focale, ou F , réservée au foyer. Un vecteur unitaire est représenté par $\mathbf{e}$. Les vecteurs unitaires des axes de référence sont représentés par $\mathbf{e}_x$, $\mathbf{e}_y$ et $\mathbf{e}_z$ et les composantes d'un vecteur $\mathbf{V}$ par V_x , V_y et V_z .

Pour bien situer le modèle de l'optique géométrique dans l'histoire de la physique et ses limites de validité, j'ai essayé au premier chapitre d'introduire le modèle corpusculaire classique, le modèle ondulatoire et la notion de photon. L'optique géométrique est une approximation de l'optique ondulatoire, lorsque la longueur d'onde est beaucoup plus petite que les dimensions caractéristiques du système.

L'ouvrage ne se limite pas à un programme d'enseignement particulier. Certaines sections ainsi que les exercices correspondants, indiqués par un astérisque (*), ne sont pas toujours traités dans un cours d'optique géométrique, au niveau de la première année d'études universitaires. Ils peuvent être supprimés sans nuire à la continuité du texte. C'est le cas notamment des sections utilisant la méthode matricielle ; laquelle est introduite en parallèle avec la méthode géométrique. La méthode matricielle permet une analyse plus systématique des systèmes optiques, elle peut avoir des applications dans des études plus poussées et elle est plus adaptée au traitement numérique des systèmes optiques complexes. Les deux chapitres sur le principe de Fermat et les aberrations peuvent également ne pas être traités.

Pour entraîner l'étudiant, j'ai inclus un bon nombre d'exemples résolus dans le texte. A la fin de chaque chapitre, j'ai résumé les principaux résultats du chapitre et proposé certaines *illustrations expérimentales*. J'ai donné ensuite quelques *conseils pour résoudre les exercices* en proposant des *questions de réflexion* qui n'exigent souvent aucun calcul. Certaines de ces questions permettent à l'étudiant d'analyser une notion, un dispositif ou un phénomène. D'autres ont pour but de synthétiser certaines connaissances et d'autres encore peuvent servir comme sujet de discussion. Quant aux *exercices*, certains d'entre eux sont de simples applications du texte ; d'autres exigent une analyse plus poussée ou introduisent de nouvelles idées. Ils sont groupés par sections identiques à celles du texte. Les exercices de difficulté moyenne sont marqués d'un carré vide ($\square$) tandis que ceux qui sont plutôt difficiles sont marqués d'un carré plein ($\blacksquare$) ; cette classification dépend évidemment du niveau de connaissances du lecteur.

Je remercie M. R. Taïlet pour de nombreuses remarques qui m'ont été très utiles.

Mon souhait est de rendre le sujet plus accessible et plus utile à l'étudiant tout en fournissant à l'enseignant un outil de travail efficace et pratique. Je serai reconnaissant aux lecteurs qui me feront part de leurs critiques ou qui me signaleront les erreurs possibles qu'ils relèveraient.

T. Bécherawy

Physique

Table des matières

Avant-Propos	5
--------------------	---

CHAPITRE 1

<i>Optique géométrique et théories de la lumière</i>	7
1.1 Introduction historique	7
1.2 Particules et ondes lumineuses	9
1.2A Modèle corpusculaire mécaniste de la lumière	9
1.2B Notion d'onde	10
1.2C Modèle ondulatoire de la lumière	11
1.2D Limite de l'optique géométrique	12
1.2E Théorie quantique de la lumière	13
1.3 Sources de lumière	15
1.4 Récepteurs de lumière	18
1.5 Vitesse de la lumière	20
1.5A Mesures astronomiques	20
1.5B Méthode de la roue dentée de Fizeau	20
1.5C Méthode des miroirs tournants	21
★1.6 Notions de photométrie	22
★1.6A Flux lumineux	23
★1.6B Luminance, intensité et émittance des sources étendues	23
★1.6C Éclairement d'une surface	26
★1.6D Unités et mesures photométriques	28

CHAPITRE 2

<i>Principes de base de l'optique géométrique</i>	37
2.1 Rayon lumineux et propagation rectiligne de la lumière	38
2.1A Notion de rayon lumineux	38
2.1B Propagation rectiligne de la lumière	38

2.1C	Indépendance des rayons lumineux	40
2.1D	Réversibilité de la propagation de la lumière	41
2.2	Lois de réflexion et de réfraction	41
2.2A	Lois de réflexion	41
2.2B	Lois de réfraction	42
2.2C	Réflexion totale et angle limite	43
★ 2.2D	Lois de réflexion et de réfraction sous une forme vectorielle	47
2.3	Formation des images et stigmatisme	48
2.4	Couleur de la lumière et dispersion	50
2.5	Théorie corpusculaire de la lumière et optique géométrique	52
2.6	Principe de Huygens et lois de l'optique géométrique	55
2.6A	Milieux homogènes et milieux isotropes	55
2.6B	Front d'onde et principe de Huygens	56
2.6C	Propagation rectiligne dans les milieux isotropes et homogènes	57
2.6D	Théorème de Malus dans le cas d'un milieu isotrope	58
2.6E	Cas d'un milieu homogène et anisotrope	58
2.6F	Lois de réflexion et de réfraction et principe de Huygens	58
2.7	Matériaux optiques	60
2.7A	Atténuation de la lumière	60
2.7B	Couleur des corps et spectre d'absorption	61
2.7C	Gaz et liquides	61
2.7D	Les verres	62
2.7E	Cristaux solides	63
2.7F	Cristaux liquides	64

CHAPITRE 3

<i>Miroirs</i>	75
3.1 Miroirs plans	76
3.2 Miroirs sphériques	78
3.2A Foyer et distance focale	78
3.2B Formules de conjugaison et de grandissement	80
Origine au centre	82
Origine au sommet	83
Origines aux foyers	83
Formule de Lagrange-Helmholtz	83
3.2C Champ des miroirs sphériques	85

3.3	Miroirs elliptiques, paraboliques et hyperboliques	86
★ 3.4	Matrice de réflexion	87
★ 3.4A	Représentation d'un rayon lumineux par une matrice colonne	87
★ 3.4B	Matrice de translation	90
★ 3.4C	Matrice de réflexion sur un miroir sphérique	91

CHAPITRE 4

	<i>Dioptries plans, lames et prismes</i>	107
4.1	Dioptre plan	108
4.1A	Formule de conjugaison	108
4.1B	Grossissement d'un dioptre plan	110
4.1C	Formule de Lagrange-Helmholtz	111
4.2	Lame à faces parallèles	111
4.3	Prisme	113
4.4	Utilisation des prismes comme déviateurs et comme réflecteurs	116
★ 4.5	Utilisation des prismes comme disperseurs en spectroscopie	117
★ 4.5A	Spectroscopie	117
★ 4.5B	Spectroscope à prisme	118
★ 4.5C	Pouvoir de résolution d'un prisme	120

CHAPITRE 5

	<i>Dioptries sphériques, lentilles minces</i>	133
5.1	Dioptre sphérique	134
	Origine au sommet	136
	Origine au centre	137
	Origines aux foyers	137
	Relation de Lagrange-Helmholtz	137
5.2	Lentilles minces	140
5.2A	Définitions	140
5.2B	Vergence et foyers	141
5.2C	Construction des images	142
5.2D	Formules de conjugaison et de grossissement	144
	Origine au centre optique	144
	Origine aux foyers, formule de Newton	145
	Relation de Lagrange-Helmholtz	145

5.3	Lentilles minces accolées	146
★ 5.4	Matrice de transfert des dioptries et des lentilles minces.	147
★ 5.4A	Matrice de transfert d'un dioptrie.	147
★ 5.4B	Matrice de transfert d'une lentille mince et de lentilles minces accolées	148

CHAPITRE 6

	<i>Principe de Fermat, propagation dans les milieux inhomogènes</i>	165
★ 6.1	Principe de Fermat	166
★ 6.1A	Chemin optique.	166
★ 6.1B	Enoncé du principe de Fermat	167
★ 6.2	Principe de Fermat et lois de l'optique géométrique.	168
★ 6.2A	Propagation rectiligne dans un milieu homogène	168
★ 6.2B	Réversibilité des chemins optiques.	168
★ 6.2C	Lois de réflexion	169
★ 6.2D	Lois de réfraction.	169
★ 6.3	Principe de Fermat et condition de stigmatisme	171
★ 6.4	Propagation de la lumière dans les milieux inhomogènes.	175
★ 6.4A	Equation des rayons lumineux	175
★ 6.4B	Le mirage	176
★ 6.4C	Déviation de la lumière dans l'atmosphère terrestre.	177
★ 6.4D	Propagation de la lumière dans une fibre optique	178
★ 6.4E	Equation différentielle des rayons lumineux.	181

CHAPITRE 7

	<i>Systèmes centrés dans l'approximation de Gauss</i>	191
7.1	Systèmes centrés.	192
7.1A	Définitions	192
7.1B	Marche des rayons lumineux	193
7.1C	Distances focales	194
7.2	Relations de conjugaison et de grandissement	196
7.3	Association de deux systèmes centrés.	198
7.4	Lentilles épaisses	200
7.5	Doublets de lentilles minces	202

7.6	Systèmes catadioptriques	205
★7.7	Stigmatisme des systèmes centrés.....	206
7.7A	Cas d'un objet ponctuel sur l'axe	206
7.7B	Cas d'un objet étendu	207
	Stigmatisme des objets transversaux, condition des sinus d'Abbe.....	207
	Stigmatisme des objets longitudinaux, condition des Herschel	207
	Stigmatisme des objets dans une direction quelconque	208
★7.8	Matrice de transfert des systèmes centrés.....	208
★7.8A	Matrice de transfert d'un système centré en fonction de ses caractéristiques.....	208
★7.8B	Matrice de transfert de l'association de deux systèmes centrés dioptriques.....	215
★7.9	Représentation analytique des systèmes centrés	218
★7.10	Système centre afocal	221

CHAPITRE 8

<i>La vision et la photographie</i>		237
8.1	Description de l'œil humain	238
8.2	Modèles simplifiés de l'œil	240
★8.3	Matrice de transfert de l'œil	243
8.4	Défauts de l'œil	244
8.5	Perception des couleurs	247
8.5A	Synthèse additive des couleurs	247
8.5B	Synthèse soustractive des couleurs	249
8.6	La photographie	251
8.6A	Description des appareils photographiques	251
8.6B	Types d'objectifs	252
8.6C	Nombre d'ouverture	252
8.6D	Plaques photographiques	253
★8.6E	Éclairement de l'image	255
8.6F	Champ	257
8.6G	Techniques photographiques spécifiques	259

CHAPITRE 9

★ <i>Aberrations des systèmes optiques centrés</i>	275
★9.1 Aberrations géométriques dues aux faisceaux larges.....	276

★9.1A	Aberrations de sphéricité	277
★9.1B	Aberration de coma	280
9.2	Aberrations géométriques dues aux faisceaux inclinés	281
★9.2A	Astigmatisme	281
★9.2B	Courbure de champ	282
★9.2C	Distorsion	282
★9.3	Analyse des aberrations géométriques	283
★9.3A	Rayons conjugués	283
★9.3B	Aberrations principales	285
★9.3C	Aberrations de l'image d'un objet à distance finie	286
	Aberrations de sphéricité	288
	Coma	288
	Astigmatisme	289
	Courbure de champ	290
	Distorsion	290
★9.4	Aberrations chromatiques	291

CHAPITRE 10

	<i>Instruments de grossissement</i>	307
10.1	Généralités sur les instruments de grossissement	308
10.2	Les loupes	310
10.3	Les projecteurs	312
10.3A	Projection d'un objet transparent	312
10.3B	Projection d'un objet très diffusant	313
10.4	Les oculaires	314
10.5	Les microscopes	315
10.6	Les télescopes	319
★10.7	Diaphragmes et pupilles	322
★10.8	Champ d'un instrument d'optique	324
★10.8A	Largeur du champ	324
★10.8B	Profondeur de champ	326
10.9	Champ d'un doublet de lentilles	329
★10.10	Pouvoir séparateur	333

★ 10.10A	Diffraction par une ouverture circulaire et critère de Rayleigh	333
10.10B	Pouvoir séparateur de l'œil	334
10.10C	Pouvoir séparateur d'un télescope	335
10.10D	Effet de la résolution du détecteur	336
10.10E	Pouvoir séparateur d'un microscope	336
	Limite de résolution, ouverture numérique	336
	Microscope à immersion	338
	Profondeur de champ à un microscope	339
★ 10.11.	Eclaircissement des images	341
APPENDICE		359
1.	Relations mathématiques utiles	359
1.1	Développement en série	359
1.2	Fonctions trigonométriques	360
1.3	Nombres complexes	360
2.	Unités en physique	361
2.1	Unités fondamentales et unités dérivées	361
2.2	Unités mécaniques	361
2.3	Unités photométriques	362
2.4	Multiplis et sous-multiplis	362
3.	Données numériques	363
3.1	Quelques constantes physiques	363
3.2	Longueurs d'onde	363
3.3	Grandeurs terrestres et astronomiques	364
4.	Alphabet grec	364
BIBLIOGRAPHIE		365
REPONSES AUX EXERCICES		367
1.	Chapitre 1	367
2.	Chapitre 2	367
3.	Chapitre 3	369
4.	Chapitre 4	369
5.	Chapitre 5	370
6.	Chapitre 6	372
7.	Chapitre 7	373
8.	Chapitre 8	377

9.	Chapitre 9	377
10.	Chapitre 10.....	378

LISTE DES SYMBOLES	383
--------------------------	-----

INDEX	387
-------------	-----

TABLE DES MATIÈRES	395
--------------------------	-----