

# L'OBSERVATION ● EN ASTROPHYSIQUE



●  
PIERRE LÉNA,  
DANIEL ROUAN

FRANÇOIS LEBRUN,  
FRANÇOIS MIGNARD,  
DIDIER PELAT

Extrait de la publication

# L'observation en astrophysique

Troisième édition augmentée et entièrement refondue

**Pierre Léna**

Université Paris Diderot - Paris 7

**Daniel Rouan**

Observatoire de Paris

**François Lebrun**

Commissariat à l'énergie atomique

**François Mignard**

Observatoire de la Côte d'Azur

**Didier Pelat**

Observatoire de Paris

Avec la collaboration de

**Laurent Mugnier**

Office national d'études et de recherches aérospatiales

**S A V O I R S    A C T U E L S**

**EDP Sciences/CNRS ÉDITIONS**

*Légende de l'illustration de couverture* : Les télescopes auxiliaires mobiles du *Very Large Telescope* européen, qui contribuent au mode interférométrique du VLT dans le proche infrarouge (chap. 6). Le fond du ciel est un montage à partir d'un cliché réel. (Images dues à l'obligeance de Pierre Kervella, Observatoire de Paris).

Nous avons fait tout ce qui était en notre pouvoir pour obtenir les autorisations de reproduction nécessaires pour cet ouvrage. Toute omission qui nous sera signalée se verra rectifiée dans la prochaine édition.

© 2008, **EDP Sciences**, 17, avenue du Hoggar, BP 112, Parc d'activités de Courtabœuf, 91944 Les Ulis Cedex A  
et  
**CNRS ÉDITIONS**, 15, rue Malebranche, 75005 Paris.

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays. Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et d'autre part, les courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (art. L. 122-4, L. 122-5 et L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle). Des photocopies payantes peuvent être réalisées avec l'accord de l'éditeur. S'adresser au : Centre français d'exploitation du droit de copie, 3, rue Hautefeuille, 75006 Paris. Tél. : 01 43 26 95 35.

**ISBN** EDP Sciences 978-2-86883-877-3

**ISBN** CNRS ÉDITIONS 978-2-271-06744-9

# Table des matières

<b>Avant-propos</b>	<b>xi</b>
<b>Avertissement</b>	<b>xv</b>
<b>I Les fondements</b>	<b>1</b>
<b>1 L'information en astrophysique</b>	<b>3</b>
1.1 Les porteurs de l'information . . . . .	4
1.1.1 Le rayonnement électromagnétique . . . . .	4
1.1.2 La matière : électrons, noyaux et météorites . . . . .	6
1.1.3 Les neutrinos . . . . .	6
1.1.4 Les ondes gravitationnelles . . . . .	8
1.1.5 L'observation <i>in situ</i> . . . . .	11
1.2 L'acquisition de l'information . . . . .	12
1.2.1 Les principales caractéristiques du photon . . . . .	13
1.2.2 Le système d'observation . . . . .	13
1.2.3 Une approche raisonnée de l'observation . . . . .	30
1.3 L'organisation mondiale de l'astronomie . . . . .	31
1.3.1 Les hommes et les femmes . . . . .	31
1.3.2 Les institutions et les politiques de recherche . . . . .	32
1.3.3 Les publications . . . . .	37
<b>2 L'atmosphère terrestre et l'espace</b>	<b>43</b>
2.1 La structure physico-chimique de l'atmosphère . . . . .	44
2.1.1 Structure verticale . . . . .	44
2.1.2 Constituants atmosphériques . . . . .	45
2.2 L'absorption du rayonnement . . . . .	49
2.3 Les émissions atmosphériques . . . . .	54
2.3.1 Émissions de fluorescence . . . . .	55
2.3.2 Émission thermique . . . . .	59
2.3.3 La technique des mesures différentielles . . . . .	61
2.4 La diffusion du rayonnement . . . . .	63

2.5	La réfraction et la dispersion atmosphérique . . . . .	66
2.6	La turbulence de l'atmosphère terrestre . . . . .	68
2.6.1	Turbulence de l'atmosphère inférieure et moyenne . . . . .	68
2.6.2	Turbulence ionosphérique . . . . .	76
2.7	L'atmosphère, convertisseur de rayonnement . . . . .	76
2.7.1	L'astronomie $\gamma$ au sol . . . . .	76
2.7.2	Gerbes atmosphériques et rayons cosmiques . . . . .	77
2.8	Les sites terrestres d'observation . . . . .	77
2.8.1	Visible, infrarouge ( $\lambda \lesssim 30 \mu\text{m}$ ) et millimétrique ( $\lambda \gtrsim 0.5 \text{ mm}$ ) . . . . .	78
2.8.2	La radioastronomie centimétrique et métrique . . . . .	80
2.8.3	L'astronomie $\gamma$ de très haute énergie . . . . .	81
2.8.4	Le rayonnement cosmique de très haute énergie . . . . .	81
2.8.5	Pollutions et parasites anthropogéniques . . . . .	82
2.8.6	L'Antarctique . . . . .	83
2.9	L'observation dans l'espace . . . . .	84
2.9.1	Les bénéfices de l'observation spatiale . . . . .	85
2.9.2	Les sources de perturbation . . . . .	86
2.9.3	Le choix des orbites . . . . .	93
2.10	La Lune, site astronomique ? . . . . .	94
<b>3</b>	<b>Rayonnement et photométrie</b>	<b>101</b>
3.1	La photométrie . . . . .	102
3.2	Notions liées au rayonnement . . . . .	107
3.2.1	Le rayonnement de corps noir . . . . .	107
3.2.2	La cohérence du rayonnement . . . . .	108
3.3	Les systèmes de magnitudes . . . . .	113
3.4	Photométrie au travers de l'atmosphère . . . . .	116
3.5	Étalonnages et standards d'intensité . . . . .	117
3.5.1	Radiofréquences ( $\lambda \gtrsim 0.5 \text{ mm}$ ) . . . . .	118
3.5.2	Submillimétrique, infrarouge et visible . . . . .	119
3.5.3	Ultraviolet et rayons X ( $0.1 \lesssim \lambda \leq 300 \text{ nm}$ ) . . . . .	125
3.5.4	Rayonnement $\gamma$ . . . . .	127
3.5.5	Quelques illustrations de spectrophotométrie . . . . .	128
3.6	L'étalonnage des dimensions angulaires . . . . .	131
<b>4</b>	<b>Les repères d'espace et de temps</b>	<b>135</b>
4.1	Le repérage spatial . . . . .	137
4.1.1	Définitions des repères d'espace . . . . .	137
4.1.2	Les repères astronomiques . . . . .	139
4.1.3	Les changements de repères . . . . .	147
4.2	La matérialisation des repères spatiaux . . . . .	153
4.2.1	Les systèmes de références célestes . . . . .	153
4.2.2	Les catalogues fondamentaux . . . . .	154
4.2.3	Le système extragalactique . . . . .	156

4.2.4	Le repère Hipparcos . . . . .	161
4.2.5	Le futur proche : la mission GAIA . . . . .	165
4.3	Le repérage temporel . . . . .	167
4.3.1	Les échelles de temps . . . . .	167
4.3.2	Le temps atomique . . . . .	171
4.3.3	Le temps universel coordonné (TUC ou UTC) . . . . .	175
4.3.4	Le temps GPS . . . . .	176
4.3.5	Les temps dynamiques . . . . .	178
4.3.6	Les dates et les époques : les comptes longs . . . . .	180
<b>II Recueillir l'information</b>		<b>183</b>
<b>5</b>	<b>Les télescopes</b>	<b>185</b>
5.1	L'objet et l'image en astronomie . . . . .	186
5.1.1	Le télescope et l'optique géométrique . . . . .	187
5.1.2	L'optique gravitationnelle . . . . .	194
5.2	La grande famille des télescopes . . . . .	195
5.2.1	Les radiotélescopes . . . . .	196
5.2.2	Les télescopes optiques au sol : visible et proche infrarouge . . . . .	199
5.2.3	Les télescopes spatiaux : de l'ultraviolet au submillimétrique . . . . .	206
5.2.4	Les télescopes X (0.1 à 10 keV) . . . . .	210
5.2.5	Les télescopes $\gamma$ ( $\geq 10$ keV) . . . . .	212
<b>6</b>	<b>Formation des images et diffraction</b>	<b>221</b>
6.1	La diffraction d'une ouverture quelconque . . . . .	223
6.1.1	Le théorème de Zernike . . . . .	223
6.1.2	L'étendue de cohérence . . . . .	227
6.1.3	La diffraction à l'infini . . . . .	228
6.1.4	Le filtrage spatial d'une pupille . . . . .	233
6.2	L'atmosphère terrestre et la perte de cohérence . . . . .	239
6.2.1	Les perturbations du front d'onde . . . . .	241
6.2.2	L'image perturbée . . . . .	244
6.2.3	L'impact de l'atmosphère sur l'interférométrie . . . . .	251
6.3	L'optique adaptative . . . . .	252
6.3.1	Mesure du front d'onde . . . . .	253
6.3.2	Dispositif correcteur de phase . . . . .	257
6.3.3	Image finale . . . . .	259
6.3.4	Sensibilité et sources de référence . . . . .	259
6.3.5	De nouveaux concepts . . . . .	264
6.4	L'interférométrie astronomique . . . . .	268
6.4.1	L'obtention du signal interférométrique . . . . .	269
6.4.2	Le transport de la lumière . . . . .	274

6.4.3	La cohérence temporelle . . . . .	277
6.4.4	Les pertes de cohérence spatiale . . . . .	277
6.4.5	L'étalonnage de la FTM instrumentale . . . . .	281
6.4.6	La clôture de phase . . . . .	284
6.5	La famille des interféromètres astronomiques . . . . .	286
6.5.1	Les réseaux de radiotélescopes . . . . .	287
6.5.2	Les réseaux optiques au sol . . . . .	296
6.5.3	L'interférométrie optique dans l'espace . . . . .	305
6.6	L'imagerie à très haute dynamique . . . . .	309
6.6.1	Coronographie et apodisation . . . . .	309
6.6.2	L'interférométrie à frange noire . . . . .	322
<b>7</b>	<b>Les récepteurs du rayonnement</b>	<b>335</b>
7.1	Propriétés générales des récepteurs . . . . .	336
7.1.1	Récepteurs d'amplitude et quadratiques . . . . .	337
7.1.2	La structure spatiale des récepteurs . . . . .	339
7.1.3	La réponse temporelle . . . . .	342
7.1.4	Les bruits . . . . .	343
7.1.5	Comment caractériser un récepteur ? . . . . .	343
7.2	Les fluctuations fondamentales . . . . .	344
7.2.1	Le bruit quantique . . . . .	349
7.2.2	Le bruit thermique . . . . .	353
7.3	Les principes physiques de la détection du rayonnement électromagnétique . . . . .	356
7.3.1	La détection des quanta . . . . .	357
7.3.2	La détection du champ électromagnétique . . . . .	368
7.4	Les récepteurs astronomiques : des X au submillimétrique . . . . .	368
7.4.1	Les performances en bruit . . . . .	369
7.4.2	La plaque photographique . . . . .	371
7.4.3	Photomultiplicateur et caméras classiques (X, UV, visible) . . . . .	372
7.4.4	Les récepteurs du rayonnement X . . . . .	378
7.4.5	Le récepteur à transfert de charge . . . . .	380
7.4.6	Le récepteur à couplage de charge CCD . . . . .	381
7.4.7	Le récepteur hybride CMOS . . . . .	388
7.4.8	Conditions d'observation dans l'infrarouge . . . . .	395
7.4.9	Évolution des matrices DTC pour l'infrarouge . . . . .	397
7.4.10	Le bolomètre . . . . .	398
7.5	Les récepteurs astronomiques : radiofréquences . . . . .	404
7.5.1	Principes généraux . . . . .	404
7.5.2	La détection hétérodyne . . . . .	410
7.5.3	La diversité de la radio-astronomie . . . . .	421
7.6	Les systèmes d'observation en astronomie $\gamma$ . . . . .	422
7.6.1	Résoudre spatialement les sources $\gamma$ . . . . .	424

7.6.2	L'analyse spectrale des sources $\gamma$ . . . . .	430
7.7	Les systèmes d'observation des neutrinos . . . . .	439
7.7.1	La détection radiochimique des neutrinos solaires . . . . .	439
7.7.2	La détection par rayonnement Čerenkov . . . . .	442
7.7.3	L'astronomie des neutrinos de haute énergie . . . . .	444
7.8	La détection des ondes gravitationnelles . . . . .	446
<b>8</b>	<b>L'analyse spectrale</b>	<b>457</b>
8.1	Les spectres en astrophysique . . . . .	458
8.1.1	La formation des spectres . . . . .	458
8.1.2	L'information en spectrométrie . . . . .	464
8.2	Les spectromètres et leurs propriétés . . . . .	471
8.2.1	Les grandeurs caractéristiques d'un spectromètre . . . . .	471
8.2.2	Les modalités d'isolement spectral . . . . .	475
8.2.3	Les modes des spectromètres . . . . .	476
8.3	Les spectromètres interférentiels . . . . .	478
8.3.1	Critères généraux . . . . .	478
8.3.2	Filtre interférentiel . . . . .	479
8.3.3	Réseaux . . . . .	479
8.3.4	Le spectromètre à transformée de Fourier . . . . .	498
8.3.5	Le spectromètre de Pérot-Fabry . . . . .	504
8.3.6	Le spectromètre de Bragg (domaine X) . . . . .	508
8.4	La spectrométrie des radiofréquences . . . . .	511
8.4.1	Les méthodes d'isolement spectral . . . . .	512
8.4.2	La spectrométrie submillimétrique . . . . .	517
8.5	Le spectromètre à résonance . . . . .	520
<b>III</b>	<b>Analyser l'information</b>	<b>525</b>
<b>9</b>	<b>Le signal en astronomie</b>	<b>527</b>
9.1	Le signal et ses fluctuations . . . . .	528
9.1.1	Le signal et le système d'observation . . . . .	528
9.1.2	Les fluctuations du signal. Notion de bruit . . . . .	529
9.1.3	Les traitements élémentaires du signal . . . . .	536
9.1.4	Un exemple spécifique de traitement de données . . . . .	545
9.2	La modélisation complète d'un système d'observation . . . . .	547
9.3	Les performances globales d'un système . . . . .	550
9.3.1	Observer avec l'interféromètre millimétrique de l'IRAM . . . . .	551
9.3.2	Observer avec l'optique adaptative NAOS . . . . .	554
9.3.3	Observer avec le satellite photométrique COROT . . . . .	556
9.3.4	Observer avec un instrument $\gamma$ à masque codé . . . . .	559
9.4	Peut-on corriger les signatures instrumentales? . . . . .	562
9.4.1	L'émission propre de l'instrument . . . . .	563
9.4.2	Le courant d'obscurité . . . . .	563



9.4.3	Les défauts de non-linéarité . . . . .	564
9.4.4	Les tensions parasites ou biais . . . . .	565
9.4.5	La lumière parasite . . . . .	565
9.4.6	La correction de <i>champ plat</i> . . . . .	566
9.4.7	Les pixels défectueux . . . . .	567
9.4.8	Les effets d'impacts de particules énergétiques . . . . .	567
9.5	Le problème de l'estimation . . . . .	567
9.5.1	Les échantillons et les statistiques . . . . .	568
9.5.2	L'estimation ponctuelle . . . . .	569
9.5.3	Quelques éléments de théorie de la décision . . . . .	569
9.5.4	Les propriétés des estimateurs . . . . .	572
9.5.5	L'inégalité de Fréchet ou de Rao-Cramér . . . . .	580
9.5.6	Les estimateurs efficaces . . . . .	582
9.5.7	L'efficacité d'un estimateur . . . . .	584
9.5.8	Le cas des estimateurs biaisés . . . . .	584
9.5.9	Borne efficace et information de Fisher . . . . .	586
9.5.10	Le cas multidimensionnel . . . . .	586
9.5.11	Les estimateurs fiables . . . . .	587
9.5.12	Quelques méthodes classiques . . . . .	589
9.6	Des données à l'objet : le problème inverse . . . . .	591
9.6.1	La position du problème . . . . .	591
9.6.2	Qu'est-ce qu'un problème bien posé? . . . . .	595
9.6.3	Les méthodes d'inversion classiques . . . . .	598
9.6.4	Les méthodes d'inversion avec régularisation . . . . .	604
9.6.5	Une application à l'imagerie par optique adaptative . . . . .	608
9.6.6	Une application à l'interférométrie coronographique . . . . .	611
<b>10</b>	<b>Grands relevés et observatoires virtuels</b>	<b>621</b>
10.1	L'astrophysique statistique . . . . .	621
10.2	Les grands relevés . . . . .	624
10.2.1	Les relevés aux longueurs d'onde du visible . . . . .	625
10.2.2	Les relevés dans l'infrarouge . . . . .	630
10.3	Un observatoire virtuel . . . . .	631
	<b>Appendice I : La transformation de Fourier</b>	<b>635</b>
I.1	Définitions et propriétés . . . . .	635
I.1.1	Définitions . . . . .	635
I.1.2	Quelques propriétés . . . . .	636
I.1.3	Cas particuliers importants : une dimension . . . . .	638
I.1.4	Cas particuliers importants : deux dimensions . . . . .	641
I.1.5	Théorèmes importants . . . . .	645
I.2	Grandeurs physiques et transformation de Fourier . . . . .	648
I.3	La transformation en ondelettes . . . . .	651

<b>Appendice II : Les variables et processus aléatoires</b>	<b>653</b>
II.1 Variables aléatoires . . . . .	653
II.2 Processus aléatoires ou stochastiques . . . . .	660
II.3 Mesures physiques et estimations . . . . .	668
II.3.1 Un exemple d'estimation : la loi des grands nombres . .	669
II.3.2 Estimation des moments d'un processus . . . . .	670
<b>Table des constantes et valeurs utiles</b>	<b>675</b>
<b>Table des missions spatiales</b>	<b>677</b>
<b>Webographie</b>	<b>679</b>
<b>Sigles et acronymes</b>	<b>697</b>
<b>Petit lexique « anglais »-français</b>	<b>705</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>707</b>
<b>Index</b>	<b>731</b>



# Avant-propos

Jusqu'à la fin de la seconde guerre mondiale, télescopes, spectromètres et plaques photographiques constituaient l'outil presque exclusif d'observations limitées au spectre de la lumière visible, outil relativement simple mais porté à un haut degré de perfection par les soins conjugués des opticiens et des astronomes. Puis dès les années 1950, l'irruption de la radioastronomie, suivie des astronomies infrarouge, ultraviolette, X,  $\gamma$ , la naissance et le développement de l'observation spatiale, l'exploration *in situ* du système solaire, l'avènement de l'informatique et la prodigieuse multiplication des capacités de traitement de l'information qui en résulta furent autant d'éléments d'un développement de l'astrophysique sans précédent. Après trois décennies d'une floraison de nouveaux outils d'observation, la première édition en français de cet ouvrage paraissait en 1986, suivie en 1988 de sa traduction en anglais (*Observational Astrophysics*, Springer). Pourtant, dix années plus tard, cette première édition devait céder la place à une seconde : les récepteurs CCD remplaçaient déjà la photographie, une nouvelle génération de télescopes optiques géants émergeait sur le sol terrestre, les premiers neutrinos d'origine cosmique avaient été détectés et l'existence des ondes gravitationnelles indirectement démontrée. La communauté astronomique mondiale évoluait aussi, puisqu'outre la version anglaise (1998), une version en chinois quelque peu mise à jour parut en 2004 à Taiwan.

Une nouvelle décennie s'étant écoulée, il nous fallut à nouveau remettre l'ouvrage sur le métier, tant l'astronomie d'observation avait progressé. L'optique adaptative ouvre des perspectives entièrement nouvelles aux télescopes optiques terrestres, tandis que l'interférométrie permet d'atteindre, au sol aujourd'hui, dans l'espace bientôt, des résolutions angulaires jusque-là réservées aux radiofréquences. Le domaine sub-millimétrique, quasi vierge encore, voit se multiplier les instruments, au sol et dans l'espace, afin d'observer les objets au décalage spectral très élevé et le rayonnement cosmologique. La découverte d'exoplanètes en nombre sans cesse croissant suscite des raffinements nouveaux de techniques anciennes, telle la coronagraphie, et ouvre un nouveau et fascinant chapitre de l'astronomie – celui de la recherche de la vie dans l'univers –, où physique, chimie, biologie travaillent de concert. Les télescopes à neutrinos se multiplient et se raffinent, tandis que ceux qui recherchent les ondes gravitationnelles entrent progressivement en service. L'exploration

spatiale du système solaire n'est pas en reste, qui multiplie les sondes et les prélèvements *in situ* sur Mars, Titan ou les noyaux cométaires. La précision des repères de temps et d'espace, utilisés par les astronomes, mais aussi par d'autres – par exemple pour l'étude fine de la dérive des continents – ne fait que croître.

Nous avons donc repris ce livre, élargi le nombre d'auteurs, largement refondu, enrichi et réorganisé le matériau des éditions précédentes sous un nouveau titre *L'Observation en astrophysique*. L'ouvrage était né de notes d'un cours professé par l'un d'entre nous (PL) aux étudiants pré-doctorants en astrophysique de l'université Denis-Diderot (Paris VII). Le parti méthodologique initial a été conservé. Par-delà la diversité des techniques propres à chaque domaine de longueur d'onde, bien traitées dans des ouvrages plus spécialisés, nous avons voulu présenter les fondements *physiques* sur lesquelles repose l'instrumentation utilisée : télescopes collectant l'information, spectromètres l'analysant, détecteurs la convertissant en signal. Après les quatre premiers chapitres, qui présentent les divers porteurs d'information (chapitre 1), les effets de l'atmosphère terrestre (chapitre 2), les bases de la photométrie (chapitre 3), puis les repères d'espace et de temps (chapitre 4), ce sont successivement les télescopes, les détecteurs (ou récepteurs) et les spectromètres qui sont présentés dans les chapitres 5 à 8, avec naturellement une insistance marquée sur la formation des images.

Cette approche isole les principes et met en évidence les performances ou limitations ultimes que la physique autorise. Ainsi le fil directeur de l'ouvrage se trouve-t-il dans les propriétés du photon (ou celles de l'onde électromagnétique), qui demeure le principal porteur de l'information en astrophysique. La collecte, la mesure, les techniques quantitatives d'analyse de cette information sont le thème de ce livre et, dans les choix indispensables, nous avons conservé tout ce qui le servait. Cette approche méthodologique limite aussi les propos : l'ouvrage ne prétend pas épuiser les méthodes d'observation ni faire de tous leurs outils une présentation systématique et exhaustive.

La complexité, les durées de développement, les coûts croissants des instruments changent radicalement la façon de travailler, le métier. Désormais et bien souvent, trop fréquemment peut-être, autre est celui qui conçoit et réalise un instrument, autre est celui qui exploite et interprète les observations. Cet ouvrage aura atteint son but s'il donne aux uns quelque moyen de faire progresser la « chasse à l'information », aux autres quelque lumière pour comprendre ces « boîtes noires » que sont devenus les grands instruments contemporains.

Cette nouvelle édition possède deux ajouts importants. Elle développe fortement le traitement du signal (chapitre 9), tant la numérisation universelle des données et la puissance des outils informatiques autorise désormais une riche exploitation de l'information. Ce chapitre, inévitablement assez mathématique, tranche quelque peu sur le reste, mais stimulera à coup sûr l'intérêt de nos lecteurs. Le chapitre 10, entièrement nouveau, fait le point sur la

collecte de gigantesques masses de données par les instruments modernes, et sur les banques où ces mesures deviennent accessibles à tous. Ceci conduit au concept d'*observatoire virtuel*, lequel modifie à son tour le mode même de travail de l'astrophysicien. Enfin, les outils mathématiques indispensables (transformée de Fourier, introduction aux probabilités et statistique) font l'objet d'appendices. Nous avons conservé, sans modifications ni enrichissement, les énoncés d'exercices issus des éditions antérieures. Malgré leur caractère parfois bien simple, ou désormais daté, il nous fut dit qu'ils étaient utiles aux étudiants, au moins à un niveau élémentaire.

Écrire un livre en 2007 conduit souvent les auteurs à s'interroger, tant le réseau de la Toile (Internet) est riche d'informations, d'images, d'actualités qui pourraient rendre dérisoire toute tentative de figer ces savoirs en un écrit durable. Cet ouvrage offre bien entendu une riche *webographie* (terme franglais peu sympathique) organisée, permettant au lecteur d'aller chercher la mise à jour des sujets traités. Mais la mise en ordre de la pensée, indispensable pour chercher avec efficacité sur la Toile, demeure d'actualité grâce au livre. C'est la conviction qui nous a guidé lors de la rédaction de celui-ci.

Puisqu'il s'agit d'un ouvrage de référence, nous avons pris le parti d'exclure du texte, le plus souvent, tout renvoi bibliographique. Nous avons simplement rassemblé, dans une bibliographie finale allégée, sans prétention d'exhaustivité et selon un classement thématique, les ouvrages de référence qui nous paraissaient les plus précieux pour un étudiant, un chercheur ou un enseignant.

Il n'est plus possible de citer et remercier ici tous les collègues, ou étudiants bien souvent devenus collègues à leur tour, qui ont contribué aux deux premières éditions et fourni des illustrations. Nous rappellerons simplement les noms de Mme Claude Audy, qui avait assuré la mise au point du manuscrit, et de Mme Hélène de Castilla, d'InterEditions, ainsi que d'Eric Gendron, qui en avait fait une attentive relecture. La présente édition a bénéficié du précieux concours de Laurent Mugnier, qui a rédigé une partie du chapitre 9, et de Marc Huertas, à qui nous devons la *webographie*. Laurent Pagani pour les radiofréquences, Michel Cribier pour les neutrinos, Philippe Laurent pour les ondes gravitationnelles, Jean Ballet pour le rayonnement X, Philippe Goret pour l'astronomie  $\gamma$  au sol, Claude Pigot ont bien voulu faire des rédactions ou relectures partielles, dont nous leur sommes reconnaissants. La Fondation des Treilles a généreusement accueilli en Provence l'un de nous (PL) pour la mise au point de ce livre : que ses membres en soient ici remerciés, ainsi que Michèle Leduc, infatigable animatrice de la collection *Savoirs actuels*.

Nous n'oublions pas que les deux éditions précédentes avaient été dédiées à la mémoire de l'astronome et physicien Philippe Delache (1937-1996). Puisse cet ouvrage, à son exemple, cultiver l'enthousiasme de nombreuses générations d'étudiants, attirés par cette astronomie que nous considérons comme la plus belle de toutes les sciences.

Les auteurs  
Paris, Mars 2008



# Avertissement

DANS CET OUVRAGE, les nombres décimaux sont représentés avec un point décimal et non avec une virgule décimale. Les vecteurs sont dénotés par un caractère droit gras ( $\mathbf{a}$ ,  $\boldsymbol{\theta}$ ), de même que les variables ou fonctions aléatoires.

L'unité d'angle est le radian (rd), qui cède souvent la place aux degrés, minutes et secondes d'angle, notés par ( $^{\circ}$ ,  $'$ ,  $''$ ) ou parfois (deg, arcmin, arcsec) selon la notation anglo-saxonne.

La bibliographie est en fin d'ouvrage. Des références spécifiques, en petit nombre, sont parfois données dans le corps du texte ou en note. Certains ouvrages ou publications qui reviennent fréquemment sont désignés par une abréviation :

*A.A.* ou *Astron. Astrophys.* : revue *Astronomy and Astrophysics*.

*AF* : Lang K.R., *Astrophysical Formulae*, 3<sup>e</sup> édition, Springer Verlag, 1999.

*Ap. J.* : revue *Astrophysical Journal*.

*Appl. Opt.* : revue *Applied Optics*.

*AQ* : Allen C.W., *Astrophysical Quantities*, 4<sup>e</sup> édition, Springer, 2000.

*ARAA* : *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*.

*Exp. Astron.* : revue *Experimental Astronomy*.

*I.E.E.E.* : *Institute of Electrical & Electronic Engineers*.

*J. Atm. Sci.* : revue *Journal of Atmospheric Sciences*.

*J.O.S.A.* : revue *Journal of the Optical Society of America*.

*M.N.R.A.S.* : revue *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*.

*P.A.S.P.* : *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*.

*S.P.I.E.* : revue *The Society for PhotoOptical Instrumentation Engineers*.

*Sol. Phys.* : revue *Solar Physics*.





Première partie

Les fondements



# Chapitre 1

## L'information en astrophysique

Le but de l'astrophysique est de décrire, de comprendre et de prévoir l'ensemble des phénomènes physiques qui se produisent dans l'univers. Les objets qui constituent cet univers – milieux denses ou dilués, chauds ou froids, stables ou instables – peuvent le plus souvent être classés par catégories : planètes, étoiles, galaxies... C'est à partir de l'*information* reçue par l'observateur et transformée en *signal* que s'établissent les classements, les modèles physiques, les prévisions qui finalement constituent cette science qu'est l'astrophysique.

Le but de l'*observation* est d'élaborer une stratégie de collecte de cette information et de hiérarchiser les différentes variables ou paramètres physiques mesurés. Il faut également en assurer le traitement afin de n'en dire ni trop – ce serait surinterpréter l'information –, ni trop peu – ce serait en perdre –, et la conserver à l'usage de comparaisons ultérieures ou à celui des générations futures.

Dans ce chapitre d'introduction, nous examinons quels sont les porteurs de cette information. Ces porteurs sont issus de l'objet étudié, le plus souvent modifiés par leur trajet dans l'espace et finalement collectés par l'observateur et ses instruments. Il s'agit en premier lieu des ondes électromagnétiques, mais aussi d'autres porteurs, tels que les ondes gravitationnelles ou les neutrinos. Il peut aussi s'agir de particules élémentaires de matière (électrons, protons, noyaux, atomes) ou de poussières de tailles variables (météorites). À ce transport d'information est associé un transport d'*énergie*, quelle qu'en soit la forme, depuis la source jusqu'à l'observateur.

Les modalités de *collecte* de cette information, lorsqu'elle parvient à la Terre, font immédiatement apparaître qu'il est impossible d'en saisir et d'en mesurer simultanément la totalité des composantes : chaque technique d'observation se comporte donc comme un *filtre d'information*, au travers duquel est saisie une fraction, généralement très faible, de la richesse d'information disponible à chaque instant. La diversité de ces filtres est considérable : ils produisent des images, des spectres, des évolutions temporelles et dépendent étroitement de la technologie ou des outils physiques disponibles à une époque

- relevé CCD, 627
  - relevé dans l'infrarouge, 630
  - relevé photométrique, 625, 628
  - relevé spectroscopique, 625, 628
  - rendement quantique, 350, 383
  - rendement quantique équivalent, 369
  - répartition (fonction de), 654
  - repère (changement de), **147**
  - repère astronomique, 139
  - repère écliptique, 145
  - repère équatorial, 143
  - repère galactique, 146
  - repère Hipparcos, 161
  - repère horaire, 142
  - repère horizontal, 140
  - réplication, 539, 640
  - réponse angulaire, 337
  - réponse impulsionnelle, 233
  - réponse spectrale, 337
  - représentation temps-fréquence, 651
  - repère de référence, 158
  - réseau échelle, 482
  - résolution spatiale, 23
  - résolution spectrale, 471
  - résonance (spectromètre à), 519
  - Reynolds (nombre de), 68
  - RGS (instrument), 485, 510
  - Richardson (loi de), 373
  - Richardson (nombre de), 73
  - Richardson-Lucy (algorithme), 610
  - risque, 569
  - robustesse, 596
  - Roddier & Roddier (coronographe), 313
  - ROSAT (mission), 211, 623
  - ROSITA (mission), 387
  - rotation de champ, 203
  - rotation pure, 463
  - rotation sidérale, 140
  - Rouan (coronographe de), 314
  - rougissement, 115
  - Rowland (montage de), 509
  - Rydberg (états de), 416, 462
  - Rydberg (formule de), 459
- S**
- SAGE (observatoire), 440
  - SALT (telescope), 202
  - Schmidt (relevé), 625
  - Schmidt (téléscope de), 194
  - Schottky (diode), 413, 418
  - SCIDAR, 71
  - scintillateur, **431**
  - scintillation, 240, 243
  - scintillation interplanétaire, 249
  - SDSS (relevé), 628, 629
  - SEC (tube), 375
  - seconde (définition de la), 172
  - section efficace, 49
  - seeing atmosphérique, 24, 246
  - Seidel (aberrations de), 191
  - semi-classique (modèle), 344
  - senseur de front d'onde, 555
  - sensibilité (ondes gravitationnelles), 452
  - SERC/AAO (relevé), 626
  - seuil de saturation, 337
  - seuil de sensibilité, 337
  - seuil photoélectrique, 357, 358
  - Shack-Hartmann (analyseur), 256
  - Shannon (pas de), 539
  - Shannon (théorème de), 239, 538
  - shift-and-add, 248
  - shot noise, 347
  - SIGMA (mission), 216
  - signal d'obscurité, 337
  - signature instrumentale, 562
  - SIM (mission), 306
  - SIMBOL-X (mission), 212
  - SINFONI (instrument), 496
  - SIT (tube), 375
  - SKA (réseau), 291
  - snapshot mode, 285
  - SNO (observatoire), 441
  - SOFIA (telescope), 208, 518
  - Soleil (mouvement moyen du), 152
  - Soleil (spectre), 128
  - sous-pupilles, 237
  - soustraction de fond de ciel, 555
  - spallation, 90
  - spectre, **458**
  - spectro-imageur, 471, 476
  - spectrohéliogramme, 497
  - spectromètre, 471
  - spectromètre à autocorrélation, 516

- spectromètre à transformée de Fourier, 498
- spectromètre acousto-optique, 513
- spectromètre de Bragg, 508
- spectromètre de Pérot-Fabry, 504
- spectromètre échelle, **490**
- spectromètre holographique, 502
- spectromètre multi-objet, 477
- spectromètre multicanaux, 476
- spectromètre séquentiel, 476
- spectrométrie intégrale de champ, 495
- spectrométrie multi-objets, 491
- spectrophotométrie, 102
- SPHERE (instrument), 318
- SPIRE (instrument), 504
- Spitzer (mission), 124, 209, 392, 517
- SQUID (circuit), 400
- SSB, 412
- standard (local de repos), 467
- standard primaire, 114
- standard secondaire, 114, 120
- station de travail, 30
- statistique, 568
- statistique des photons, 111
- Stefan (loi de), 107
- sténopé, 213, 214
- stigmatisme, 187
- Stokes (paramètres de), 105, 516
- stratosphère, 44, 68
- Strehl (rapport de), 259
- structure (constante de), 242
- structure (fonction de), 242
- structure fine, 462
- structure hyperfine, 462
- SUBARU (télescope), 60
- SUBMILLIMETRON (mission), 414
- suiveur de frange, 300
- super-résolution, 251
- supernova SN 1987A, 443
- supersynthèse d'ouverture, 289
- suréchantillonnage, 189
- sursaut  $\gamma$ , 218
- sursaut solaire, 292
- sursauteur, 218
- SWIFT (instrument), 218
- synthèse d'ouverture, 238, **289**
- système cinématique, 157
- système horizontal, 141
- système de référence, 153, 158
- ## T
- TAI, 174
- tasimètre, 390
- taux de citation, 41
- tavelure, 248, 259, 347
- tavelure (annulation des), 322
- Taylor (hypothèse de), 75
- TDRSS (satellites), 94
- téledétection, 11
- téléométrie laser-Lune, 157
- télescope, 212
- télescope (ondes gravitationnelles), 447
- télescope Čerenkov, 428
- télescope Compton, 424
- télescope gravitationnel, 194
- télescope optique, 199
- télescope X, 210
- télescope UV, 206
- télévision à comptage, 375
- tellurure de cadmium, 437
- température d'antenne, 61, **405**
- température de bruit, 406
- température potentielle, 73
- temps
- équation des temps, 170
  - sidéral, 150
  - césium, 172
  - solaire, 169
  - TUC, 175
  - UTC, 175
- temps (échelles de), 167
- temps atomique, 171
- temps atomique international, 174
- temps civil, 171
- temps des éphémérides, 178
- temps dynamique, 178
- temps dynamique barycentrique, 178
- temps dynamique terrestre, 178
- temps Galileo, 177
- temps GPS, 176
- temps sidéral, 150
- temps solaire vrai, 169
- temps terrestre, 178
- temps universel, 171