

L'OBSERVATION ● EN ASTROPHYSIQUE



●
PIERRE LÉNA,
DANIEL ROUAN

FRANÇOIS LEBRUN,
FRANÇOIS MIGNARD,
DIDIER PELAT

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

Avant-propos	xi
Avertissement	xv
I Les fondements	1
1 L'information en astrophysique	3
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
2 L'atmosphère terrestre et l'espace	43
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 γ 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 γ 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
3	Rayonnement et photométrie	101
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 γ	127
3.5.5	Quelques illustrations de spectrophotométrie	128
3.6	L'étalonnage des dimensions angulaires	131
4	Les repères d'espace et de temps	135
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
II Recueillir l'information		183
5	Les télescopes	185
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 γ (≥ 10 keV)	212
6	Formation des images et diffraction	221
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
7	Les récepteurs du rayonnement	335
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 γ	422
7.6.1	Résoudre spatialement les sources γ	424

7.6.2	L'analyse spectrale des sources γ	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
8	L'analyse spectrale	457
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
III	Analyser l'information	525
9	Le signal en astronomie	527
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 γ 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
10	Grands relevés et observatoires virtuels	621
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
	Appendice I : La transformation de Fourier	635
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

Appendice II : Les variables et processus aléatoires	653
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
Table des constantes et valeurs utiles	675
Table des missions spatiales	677
Webographie	679
Sigles et acronymes	697
Petit lexique « anglais »-français	705
Bibliographie	707
Index	731

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, γ , 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 français 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 γ 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.

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^e édition, Springer Verlag, 1999.

Ap. J. : revue *Astrophysical Journal*.

Appl. Opt. : revue *Applied Optics*.

AQ : Allen C.W., *Astrophysical Quantities*, 4^e 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
 - Roddiér & Roddiér (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 γ , 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