

**Hélène Courtois
Agnès Acker**

Astrophysique

**Rappels de cours,
exercices et problèmes corrigés**

DUNOD

Illustration de couverture © The orion Nebula in Visible and Infrared
Infrared : NASA, Spitzer Space Telescope ;
Visible : Oliver Czernetz, Siding Spring Obs.

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, 2016

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-075596-7

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	V
Remerciements	VII
Chapitre 1. Nos repères dans le ciel – Le système solaire	1
1.1 Se positionner dans le ciel	1
1.2 Le temps	3
1.3 Inventaire du système solaire	4
1.3.1 Les planètes	4
1.3.2 Les satellites des planètes	6
1.3.3 La ceinture d'astéroïdes	6
1.3.4 Les comètes	7
1.3.5 La ceinture de Kuiper et le nuage de Oort	8
1.4 Formation du système solaire	9
1.5 Les modèles de formation	10
1.6 Les planètes extrasolaires	10
Exercices	11
Solutions	56
Chapitre 2. Propriétés et évolutions des étoiles	107
2.1 Lumière des étoiles : Introduction	107
2.1.1 Notions de photométrie : flux et luminosité	108
2.1.2 Dilution du flux avec la distance	108
2.1.3 Spectres stellaires	109
2.1.4 Types spectraux	110
2.1.5 Diagramme HR	110
2.2 Évolution stellaire	111
2.2.1 Formation des étoiles	111
2.3 Classification spectrale	112
2.3.1 Mesure des distances	112
2.3.2 Mesure des rayons	113
2.3.3 Mesure de masse	113
2.4 Détermination des masses stellaires	114
2.4.1 Le problème des deux corps	114
2.4.2 Calcul de la masse du Soleil	116
2.4.3 Cas des étoiles binaires	117
2.4.4 Cas des autres étoiles : la relation masse-luminosité	119
Exercices	120
Solutions	138

Astrophysique

Chapitre 3. Galaxies et cosmologie	157
3.1 Les galaxies	157
3.1.1 Le gaz	159
3.1.2 La poussière	160
3.1.3 La matière noire	160
3.2 La cosmologie	161
3.2.1 Expansion de l'Univers	162
3.2.2 Le facteur d'échelle	163
3.2.3 Le redshift cosmologique	164
3.2.4 Observations cruciales	165
Exercices	166
Solutions	190
Bibliographie	207
Index	209

AVANT-PROPOS

L'astronomie, l'astrophysique et plus largement les sciences de la Terre et de l'Univers attirent beaucoup d'étudiants des premières années d'université. Afin de satisfaire cette soif de connaissances d'un nombre toujours plus grand d'étudiants inscrits dans nos enseignements, nous avons développé au cours des années notre propre matériel pédagogique. En particulier nous avons voulu construire des exercices qui permettent l'application des lois apprises en cours, mais surtout qui permettent de conduire une réflexion personnelle scientifique. Nous sommes persuadés que plus on adopte une attitude d'entrepreneur de sa culture scientifique, plus on se forge un caractère de chercheur. C'est-à-dire un esprit à la fois libre, curieux et largement ouvert à l'apprentissage de nouveaux savoirs.

C'est pourquoi dans ce livre nous ne donnons que quelques rappels de cours et plongeons rapidement dans des questions parfois plutôt calculatoires, parfois plutôt réflexives sur les procédés régissant un phénomène de planétologie, d'astronomie ou d'astrophysique.

La progression des exercices ne suit pas le niveau de difficulté. La lectrice ou le lecteur peut donc sans préjugé s'essayer à la résolution d'une question. L'issue de cette réflexion dépendra de son degré d'implication car elle/il devra éventuellement conduire quelques recherches personnelles pour intégrer toutes les subtilités qui s'offriront à son esprit. Les solutions des exercices sont là en filet de secours, afin que chacun puisse avoir la satisfaction d'au moins entrevoir la progression de la construction d'une connaissance, même si elle/il n'a pas réussi à construire ce chemin intellectuel sans avoir recours au corrigé.

Hélène Courtois et Agnès Acker

Hélène Courtois, professeur et vice-présidente de l'université Lyon 1, membre senior de l'Institut universitaire de France, est directrice d'une équipe de recherche en cosmologie à l'Institut de physique nucléaire de Lyon, et codirectrice de deux consortiums internationaux, « Cosmic Flows » et « Clues ». Elle a participé dès 2006 à la confirmation de l'accélération de l'expansion de l'Univers par les supernovæ ; en 2014, elle a redéfini la notion de superamas de galaxies, et nommé le supercontinent céleste qui contient la Voie lactée : *Laniakea*, signifiant « horizons célestes immenses ».

Hélène Courtois se passionne aussi pour la diffusion de l'astronomie auprès du public. En particulier, depuis 2013, elle est la marraine du planétarium de Vaulx-en-Velin.

Agnès Acker, professeur émérite de l'université de Strasbourg, a été la directrice de l'équipe de recherche « Populations stellaires » de l'Observatoire de Strasbourg pendant dix ans. Ses recherches ont été principalement consacrées aux stades tardifs de l'évolution d'étoiles de type solaire : nébuleuses planétaires, binarité des noyaux, vents stellaires.

Agnès Acker est la fondatrice du planétarium de Strasbourg et la présidente-fondatrice de l'Association des planétariums de langue française. Elle est l'auteur de nombreux ouvrages et documents pédagogiques.

REMERCIEMENTS

Ce livre est issu des cours et exercices qui ont été développés dans les universités de Lyon I et Strasbourg. Les professeures d'université, maîtres de conférences et astronomes principaux auteurs de ces exercices sont :

A. Acker, G. Adam, A. Arbey, D. Boutigny, L. Chevallier, N. Chotard, Y. Copin, H. Courtois, J. Devriendt, E. Emsellem, P. Ferruit, D. Guinet, J.-F. Gonzalez, P. Merlin, G. Panczer, E. Pécontal, E. Thiébaud, F. Sibille, M. Vander Donckt, I. Vauglin, H. Wozniak.

Merci aussi à tous les autres enseignants et moniteurs qui ont permis au cours des années de traquer les coquilles et d'améliorer ces exercices.

Certaines illustrations ont été développées avec l'aide de stagiaires du service d'accompagnement pédagogique de l'université Lyon I.

Merci à Alexandra Dupuy et Éric Guéguen pour leur aide précieuse à la préparation de cet ouvrage.

NOS REPÈRES DANS LE CIEL – LE SYSTÈME SOLAIRE

1

PLAN

- 1.1 Se positionner dans le ciel
- 1.2 Le temps
- 1.3 Inventaire du système solaire
- 1.4 Formation du système solaire
- 1.5 Les modèles de formation
- 1.6 Les planètes extrasolaires

1.1 SE POSITIONNER DANS LE CIEL

En astronomie, le repérage n'est pas considéré comme faisant vraiment partie de l'astrophysique, quoiqu'il fut pendant des siècles une occupation majeure des astronomes occupés à percer les mystères du ciel cachés derrière le mouvement diurne, celui du Soleil, des planètes, des étoiles et accessoirement d'autres objets étranges comme les comètes, les météores et autres phénomènes lumineux et temporaires. L'Astronomie de position ou plus particulièrement l'astrométrie est maintenant davantage considérée comme un instrument de travail pour les astrophysiciens, complément indispensable pour échafauder leurs modèles physiques d'étoile, de galaxies, de cosmologie.

Néanmoins, sans une base de connaissance des notions de repérage, de coordonnées, il est difficile de se mouvoir dans l'univers astrophysique. Constamment, il sera fait appel aux notions de positions et de coordonnées des objets pour décrire les observations et appliquer les théories. De plus, la rotation de la Terre et son mouvement autour du Soleil entraînent pour la vie courante des contraintes qu'il vaut mieux comprendre. Ceci fait partie des conditions élémentaires de notre vie imposées par des phénomènes aussi simples que l'alternance des jours et des nuits ou la suite des saisons.

Regarder la voûte céleste par une nuit noire et sans Lune permet de voir un grand nombre d'étoiles d'éclat plus ou moins intense. Pour s'y orienter, il est plus facile de repérer les plus brillantes et de les grouper par petits ensembles appelés constellations. Depuis l'Antiquité, on leur attribua des noms qui sont pour la plupart encore usités : Grande Ourse, Bouvier, Hercule, etc.

Chapitre 1 • Nos repères dans le ciel – Le système solaire

Des nomenclatures permettent de désigner les étoiles les plus brillantes soit par des noms, soit par des lettres grecques ou des numéros, souvent en rapport avec la constellation où se trouve l'objet.

A priori, en vision directe, les astres semblent tous fixés sur une (demi-)sphère de très grande dimension, car on ne peut évaluer leur distance. Cette sphère est appelée la sphère céleste.

Les objets visibles au-dessus de l'horizon (du latin *horizon*, « qui borne ») ne sont pas fixes, mais paraissent tourner autour d'un point de cette sphère, point qui est le prolongement dans le ciel de l'axe de rotation de la Terre. On l'appelle le Pôle céleste nord pour nous, habitants de l'hémisphère nord.

Pour localiser les objets terrestres ou célestes, il faut disposer d'un repère se rapportant au lieu d'observation.



Figure 1.1 – La planète Terre (Solar System Lithograph Set).

Soit un observateur à la surface de la Terre en O. Pour lui, les étoiles semblent donc fixées sur une immense sphère imaginaire ou sphère céleste, dont on ne voit que la moitié supérieure limitée par le plan horizon. Ce plan est défini soit comme étant perpendiculaire à la verticale du lieu, soit comme étant la surface d'un plan d'eau. Cette verticale perce la sphère céleste en deux points : le zénith au-dessus (de l'arabe *senit*, « droit chemin ») et le nadir au-dessous (de l'arabe *nazir*, « opposé »).

La droite passant par les poles terrestres et l'observateur, parallèle à l'axe de rotation de la Terre s'appelle axe du monde et perce la sphère céleste en deux points : le pôle céleste nord et le pôle céleste sud. C'est autour de cet axe que semble s'effectuer le mouvement des étoiles dans le ciel.

Le plan passant par l'axe du monde et le zénith du lieu s'appelle le plan méridien. Le demi grand cercle de la sphère céleste passant par les pôles et le zénith est le