

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 978-2-10-074224-0

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.

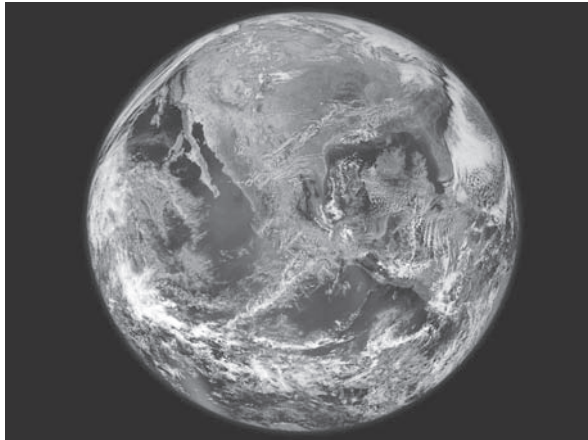


Figure 1.1- La planète Terre (Solar System Lithograph Set).

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 pôles 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

méridien du lieu, ou encore l'intersection du plan méridien et de la sphère céleste (plan de la figure).

L'intersection du plan passant par l'observateur O, perpendiculaire à l'axe du monde avec la sphère céleste, est le grand cercle équateur céleste.

Le cercle méridien coupe le plan horizon en deux points : nord et sud, respectivement vers le Pôle Nord et le Pôle Sud. La perpendiculaire à l'axe nord-sud dans le plan horizon définit les points Est et Ouest. Nord - Est - Sud - Ouest sont dans cet ordre dans le sens rétrograde. Les points Est et Ouest sont aussi les intersections du cercle équateur céleste avec le plan horizon.

1.2 LE TEMPS

La rotation de la Terre sur elle-même est un mouvement périodique très uniforme. La durée de cette rotation peut servir de référence. On définit ainsi le jour solaire (jour = durée et non pas alternance nuit-jour). C'est la durée que met le Soleil à revenir dans la même direction (le sud par exemple). C'est vingt-quatre heures par définition. Le jour sidéral est la durée qui s'écoule entre deux passages consécutifs au méridien du point vernal.

Ayant une échelle des durées, on peut définir un temps qui est la mesure des durées par rapport à une origine. On prendra le plus souvent le moment de passage d'un objet céleste au méridien.

La durée séparant cet instant sera mesurée par l'angle horaire de l'objet par rapport au méridien.

Pour l'astronome, le temps ou son repère est la mesure d'un angle.

Le temps solaire est l'angle horaire du Soleil. La durée entre deux passages consécutifs du Soleil au méridien définit le jour solaire.

Les astronomes se sont donnés sur la sphère des fixes un point origine : le point vernal (du latin *vernalis*, « qui appartient au printemps ») ou point γ (symbole provenant de la constellation du Bélier où se trouvait il y a 3000 ans le point vernal), que l'on définit sur l'équateur céleste en fonction du mouvement du Soleil.

Le temps sidéral local est l'angle horaire du point vernal en un lieu donné. Ce temps est fonction de la longitude de l'observateur. Le temps sidéral n'est pas un temps très utile pour la vie du citoyen moyen, il n'y a pas de jour et de nuit sidéraux. Il ne sert qu'à repérer à un moment donné la position de la sphère céleste pour en déduire celles des astres. Pour observer, il faudra donc savoir passer de notre temps civil au temps sidéral.

La rotation de la Terre est affectée par de petites irrégularités. Ceci a poussé les physiciens à rechercher un étalon plus stable qu'ils ont trouvé dans le temps atomique.