



S C I E N C E S & H I S T O I R E

L'Univers

James Lequeux

dévoilé

L'Univers dévoilé

Une histoire de l'astronomie
de 1910 à aujourd'hui

James Lequeux

Astronome à l'Observatoire de Paris



17, avenue du Hoggar
Parc d'activités de Courtabœuf, BP112
91944 Les Ulis Cedex A, France

ISBN : 2-86883-792-1

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, 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 intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2005

Sommaire

Sommaire	iii
Avant-propos	v
1 1910-1950, les débuts de l'astronomie contemporaine. Physique et astronomie, l'ère des grands télescopes	1
2 1950-1970, nouveaux domaines, nouveaux objets	31
3 1970-1980, l'ère de l'espace et des ordinateurs	81
4 1980-1990, une période de transition	103
5 Après 1990 : la course au gigantisme	117
6 Une vue contemporaine de l'Univers. I. Du système solaire à la Galaxie	143
7 Une vue contemporaine de l'Univers. II. Astronomie extragalactique et cosmologie	191
8 Que pourrait être l'astronomie de demain ?	231
Appendice 1 : Petite histoire de l'interférométrie en France	249
Appendice 2 : L'optique gravitationnelle	255
Références	259
Sigles	269
Glossaire	273
Index	281

Avant-propos

La plupart des Histoires de l'astronomie, même récentes, s'arrêtent à la découverte par Hubble de l'expansion de l'Univers, qui date de 1929, ou au mieux au milieu du xx^e siècle. Faut-il voir là le résultat d'une certaine timidité vis-à-vis de l'histoire contemporaine dont certains acteurs sont toujours vivants, ou vis-à-vis de la complexité croissante de la science ? Pourtant, le dernier siècle a vu d'incroyables progrès dans notre connaissance de l'Univers, comparables à ceux réalisés au xvi^e et au xvii^e siècles par les grands pionniers qu'étaient Nicolas Copernic, Tycho Brahe, Johannes Kepler, Galilée et Isaac Newton. Si l'on a pu parler pour cette période de révolution astronomique, on peut affirmer que l'essentiel de l'Univers nous est aujourd'hui dévoilé. Ce sont l'histoire et les moyens des progrès de l'astronomie depuis cent ans que veut résumer ce livre.

Devant l'immensité de la tâche que serait l'écriture d'une véritable histoire de l'astronomie au cours du dernier siècle, on ne peut que rester modeste. Aussi le présent ouvrage n'est-il qu'un embryon d'histoire de l'astronomie contemporaine. Mon but est de faire partager à un public aussi large que possible quelques idées et opinions sur l'évolution récente d'une science que j'ai vécue activement depuis cinquante ans. J'espère aussi lui communiquer mon enthousiasme pour les progrès récents de notre vision de l'Univers.

Le livre suit un ordre chronologique. Le premier chapitre couvre les années 1910 à 1950, et le suivant une période de vingt années, ce qui nous amène à 1970. Ensuite, le rythme des découvertes s'accélère tellement que les trois chapitres suivants, qui insistent sur les techniques d'observation, ne couvrent chacun qu'une décennie. Les chapitres 6 et 7 font l'état des lieux à l'orée du xxi^e siècle, et le chapitre suivant tente quelques projections sur ce que pourrait être l'avenir de l'astronomie. Bien entendu, j'ai dû faire des choix dans les sujets que j'ai développés ; pour ne pas lasser le lecteur, j'ai fait souvent l'impasse sur des sujets quelque peu arides comme la photométrie, malgré son importance pratique pour les astronomes^a.

^a L'histoire de la photométrie astronomique au xx^e siècle est bien développée dans l'ouvrage de Leverington D. (1995) *A history of astronomy from 1890 to the present*, Springer-Verlag, Berlin. Pour l'histoire de l'astronomie solaire et stellaire, voir Tassoul J.-L., Tassoul M. (2004) *A concise history of solar and stellar physics*, Princeton University Press.

Je me suis efforcé de ne pas entrer dans trop de détails techniques, mais c'était quelquefois impossible. Un glossaire devrait aider à comprendre quelques-uns des concepts et la nomenclature de base de l'astronomie d'aujourd'hui, et des textes encadrés et deux appendices détaillent des points particulièrement dignes d'intérêt. De nombreuses notes donnent des références aux articles de recherche originaux, qui permettront aux lecteurs les approfondissements qu'ils jugeront souhaitables. Il ne m'a évidemment pas été possible de citer tous les articles importants, ni même le nom de tous les collègues qui me paraissent avoir contribué de façon fondamentale aux progrès de l'astronomie, et dont certains sont mes amis : qu'ils veuillent bien m'en excuser.

Je tiens à remercier mon épouse Geneviève, Claudine Laurent et Charles Ryter pour leur relecture attentive de cet ouvrage, et pour leurs commentaires et critiques particulièrement constructifs.

Chapitre 1

1910-1950, les débuts de l'astronomie contemporaine. Physique et astronomie, l'ère des grands télescopes

L'état de l'astronomie au début du xx^e siècle

On a peine à imaginer à quel point nos connaissances sur l'Univers étaient rudimentaires au début du xx^e siècle. La différence entre ce que l'on savait à l'époque et ce que l'on sait aujourd'hui est encore plus considérable en astronomie qu'en physique. Toute la physique classique — en gros l'essentiel de ce que l'on enseigne au lycée — était alors construite, bien que les connaissances en physique de l'atome et des particules élémentaires fussent encore des plus primitives. Mais en astronomie, de même qu'en biologie et en sciences de la Terre, tout ou presque restait à faire.

Les seules branches de l'astronomie qui, en 1900, avaient atteint leur majorité, depuis longtemps d'ailleurs, étaient l'astronomie de position et la mécanique céleste. La théorie des mouvements des planètes et des satellites avait acquis un degré de perfection tout à fait remarquable, fruit notamment d'une très importante participation française — il suffit de citer les noms de Joseph-Louis de Lagrange, Pierre-Simon de Laplace, Urbain Le Verrier, Charles Delaunay, Félix Tisserand et plus récemment d'Henri Poincaré. Le reste était bien moins avancé. On possédait bien quelques idées qualitatives sur la nature et la composition du Soleil : François Arago avait montré en 1811, en constatant l'absence de polarisation de sa lumière, que la surface du Soleil et de certaines étoiles était gazeuse et non solide ou liquide. Cette conclusion fut confirmée par l'observation de l'assombrissement des bords de l'image du Soleil sur les daguerréotypes pris par Hippolyte Fizeau et Léon Foucault en 1844-45¹ (Fig. 1.1). Il faut voir là la naissance de l'astrophysique, c'est-à-dire de l'application de la physique à l'astronomie. En 1860, les Allemands Robert Bunsen et Gustav Kirchhoff avaient reconnu dans le spectre du Soleil les raies caractéristiques de plusieurs éléments chimiques : le fer, le calcium, le magnésium, le nickel et le chrome². Aux États-Unis, Henry A. Rowland avait trouvé par spectroscopie 36 éléments dans le Soleil, incluant l'hélium qui ne fut que plus tard identifié sur Terre³. Mais les idées que l'on avait sur l'atmosphère

Figure 1.1. Daguerriéotype du Soleil pris par Fizeau et Foucault en 1845. C'est une des toutes premières photographies d'objets célestes. On y voit des taches et aussi l'assombrissement des bords du Soleil, qui a permis de confirmer la nature gazeuse de l'astre.

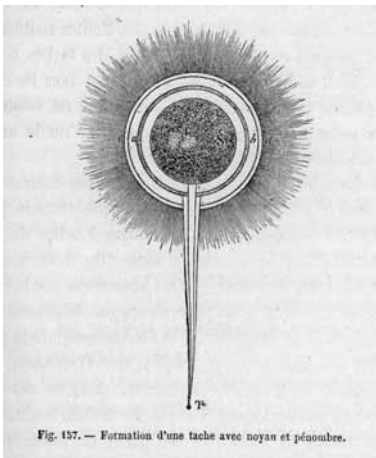
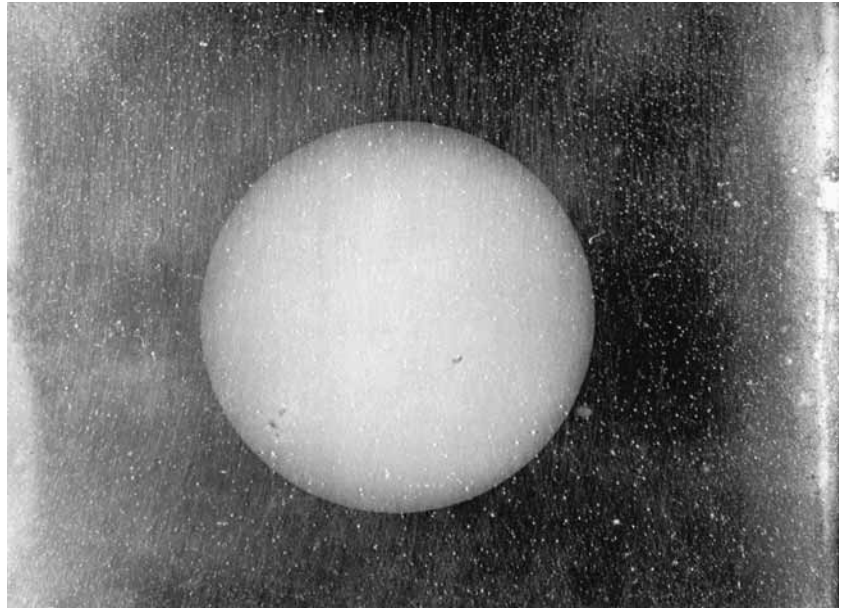


Figure 1.2. Comment Arago concevait le Soleil⁴. Il avait montré que la partie visible du Soleil était faite d'un gaz incandescent. Cependant il pensait que les taches solaires sombres, et la pénombre de luminosité intermédiaire qui les entoure, étaient des zones plus profondes du Soleil vues à travers des trous, zones qui n'étaient pas forcément gazeuses.

solaire (Fig. 1.2) étaient à peine plus exactes que du temps du Père Athanasius Kircher, jésuite qui avait fait les premières observations systématiques des taches du Soleil vers 1635. En 1900, on ignorait tout de l'intérieur du Soleil et de l'origine de son énergie.

Quant à l'astronomie planétaire, c'était un domaine où l'imagination atteignait au délire, étayée par des observations fantaisistes comme celle des fameux « canaux » de Mars, qui étaient supposés avoir été construits par des êtres vivants. La célèbre *Astronomie populaire* de Camille Flammarion, et ses autres ouvrages, notamment *La Planète Mars et ses conditions d'habitabilité*, publié en 1892, en sont des témoignages poétiques et farfelus. Voici un extrait de ce dernier livre (p. 588) :

« Les variations considérables observées en ce réseau aquatique [sic!] sont pour nous un témoignage que cette planète [Mars] est le siège d'une énergie volatile. [...] Tandis que nous observons tranquillement ces continents et ces mers [...], tandis que nous nous demandons sur lequel de ces rivages il serait le plus agréable de vivre, peut-être y a-t-il là, en ce moment même, des orages, des volcans, des tempêtes, des tumultes sociaux et tous les combats de la lutte pour la vie. »

Lorsque l'imagination supplée l'absence de connaissances scientifiques, les vieux mythes de l'humanité surgissent avec toute leur force. Ils n'ont pas disparu aujourd'hui, même dans l'esprit de certains astronomes, ainsi qu'en témoigne la naïveté des idéogrammes emportées par plusieurs sondes spatiales, qui sont destinés à être déchiffrés par d'éventuels habitants d'autres mondes. Les coûteuses expériences

emportées par les sondes VIKING dans le but de détecter des traces de vie sur Mars, presque d'emblée vouées à l'échec car trop rudimentaires, n'étaient-elles pas elles-mêmes des manifestations de la poursuite de ces mythes ?

La connaissance des parties plus lointaines de l'Univers n'était guère plus avancée. Cependant les astronomes du XIX^e siècle avaient déjà découvert qu'il existe du gaz entre les étoiles. William Herschel s'était demandé en 1791 en quoi consistait le « fluide brillant », visiblement de nature non stellaire, qui forme certaines des « nébuleuses » cataloguées vingt ans auparavant par le Français Charles Messier (l'encadré 1.1 définit ce que l'on a entendu jusqu'au milieu du XX^e siècle par le terme de nébuleuse). En 1864, Sir William Huggins reconnaissait dans le spectre de plusieurs de ces nébuleuses des raies d'émission semblables à celles qui sont produites en laboratoire par un gaz dilué soumis à une décharge électrique⁵. D'autres nébuleuses, notamment la grande Nébuleuse d'Andromède, ne montraient cependant pas de raies d'émission (ou du moins elles n'étaient pas détectables avec les instruments de l'époque), mais plutôt, comme les étoiles, un spectre continu avec des raies d'absorption. On commença à réaliser qu'il pouvait s'agir d'objets de nature différente : les uns faits de gaz et les autres d'étoiles, groupées en amas trop éloignés pour qu'elles puissent y être observées séparément.

Encadré 1.1. Les nébuleuses

Au XVIII^e siècle, les chercheurs de comètes étaient gênés par la présence dans le ciel d'objets nébuleux qu'ils ne pouvaient pas distinguer par l'observation visuelle : il fallait attendre plusieurs nuits pour que le mouvement éventuel de l'objet par rapport aux étoiles permette de l'identifier ou non comme une comète. C'est pourquoi l'astronome parisien Charles Messier, lui-même découvreur de nombreuses comètes, a publié en 1771 le premier catalogue de « nébuleuses », catalogue dont la nomenclature est toujours utilisée. Ce catalogue a été considérablement enrichi au XIX^e siècle sous la forme du *New General Catalogue* (NGC), qui répertorie près de 8 000 nébuleuses. Ces catalogues contiennent plusieurs catégories de nébuleuses que l'on ne peut distinguer les unes des autres que par une observation détaillée, notamment spectroscopique. On y trouve :

- des *nébuleuses extragalactiques*, aujourd'hui appelées *galaxies* : par exemple, la galaxie des Chiens de chasse (Fig. 1.3) est l'objet M 51 de Messier ou NGC 5194-5195 du *New General Catalogue* (deux numéros car elle est double) ; leur spectre peut comporter des raies d'absorption dues aux étoiles qui les forment, ou des raies d'émission dues au gaz ionisé lumineux qu'elles contiennent éventuellement, ou les deux à la fois ;



Figure 1.3. La galaxie des Chiens de Chasse M 51. La structure spirale exceptionnellement marquée de cette galaxie est principalement due à l'action gravitationnelle du compagnon apparemment situé au bout d'un bras. Cette photographie a été obtenue avec une caméra CCD à grand champ au foyer du télescope CFH.



Figure 1.4. La nébuleuse planétaire NGC 6369, observée avec le télescope spatial Hubble. Le gaz éjecté par une étoile entoure le reste de cette étoile, visible au centre de l'image; le rayonnement ultraviolet intense de ce reste très chaud ionise le gaz et le rend lumineux. Vues dans une petite lunette avec une faible résolution angulaire, les nébuleuses planétaires ressemblent au disque d'une planète, d'où leur nom.

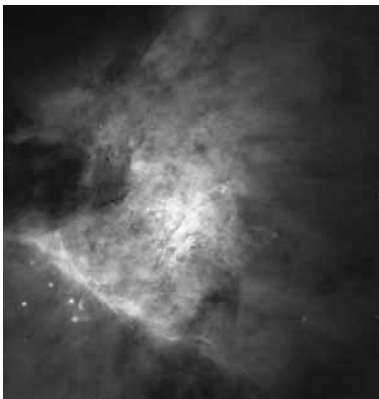


Figure 1.5. La nébuleuse d'Orion, observée avec le télescope spatial Hubble. C'est le prototype des nébuleuses gazeuses ou régions HII, faites de gaz ionisé par des étoiles chaudes (ici les quatre étoiles formant le Trapèze, dont deux sont visibles au centre). La barre en bas à gauche est à l'interface entre la nébuleuse et un nuage sombre.

- des *nébuleuses planétaires* (Fig. 1.4), ainsi nommées car on peut éventuellement les confondre avec des planètes; il s'agit de gaz et de poussières expulsés par les étoiles de masse moyenne à la fin de leur vie, le gaz étant ionisé par le rayonnement ultraviolet émis par le reste très chaud de l'étoile; leur spectre montre de nombreuses raies d'émission très intenses;

- des *restes de supernovae*, formés comme les nébuleuses planétaires de gaz et de poussières expulsés par les étoiles, cette fois de grande masse, à la fin de leur vie; on y trouve également des particules de haute énergie; le seul objet de ce type dans le catalogue de Messier est la Nébuleuse du Crabe M 1 (voir Fig. 2.17); le spectre des restes de supernovae montre des raies d'émission différentes de celles des nébuleuses planétaires;

- des *nébuleuses gazeuses*, également appelées *régions HII* et autrefois *nébuleuses galactiques* (Fig. 1.5), formées de gaz interstellaire ionisé par le rayonnement ultraviolet d'étoiles chaudes nées en leur sein; leur spectre (voir Fig. 1.11) est assez semblable à celui des nébuleuses planétaires, mais leur morphologie est généralement beaucoup plus irrégulière;

- des *nébuleuses par réflexion* (Fig. 1.6), dont la lumière est celle d'une étoile brillante diffusée par les poussières interstellaires environnantes; leur spectre montre les mêmes raies d'absorption que l'étoile.

Il faudrait y ajouter les *nébuleuses obscures* (Fig. 1.6 et 1.7), aussi appelées *nuages sombres*, *globules*, etc., qui sont des concentrations de matière interstellaire dont les poussières absorbent la lumière des étoiles situées à l'arrière, et qui apparaissent donc comme des trous dans la distribution des étoiles. Elles font l'objet de catalogues spécialisés.

La base de données SIMBAD du Centre de données astronomiques de Strasbourg (CDS : <http://simbad.u-strasbg.fr>) permet de s'y retrouver dans cet imbroglio.

Dès la fin du XVIII^e siècle, Herschel s'était interrogé sur la nature de la Voie lactée, cette grande bande lumineuse qui traverse le ciel d'été, et avait conclu que celle-ci était un système aplati auquel appartiennent toutes les étoiles (Fig. 1.8). Analyser la structure de ce système et estimer ses dimensions était une autre affaire. Le XIX^e siècle a accumulé à cet effet un grand nombre d'observations d'étoiles, mais ce n'est qu'en 1908 que le Hollandais Jacobus Kapteyn put obtenir une idée assez correcte de l'épaisseur locale de la Voie lactée⁶, appelée aussi *Galaxie* avec un G majuscule (Fig. 1.9); cependant, l'incertitude la plus grande régnait encore sur les estimations de son diamètre et sur la localisation du Système solaire en son sein. Comme on pouvait s'y attendre, l'idée selon laquelle le Soleil pourrait occuper une position plutôt centrale a alors dominé; elle devait se révéler fausse.



Figure 1.6. La région de la Tête de cheval. Un nuage sombre, dont la Tête de cheval est une protubérance qui se découpe sur un fond lumineux, occupe toute la partie inférieure de la figure. En bas à gauche, la nébuleuse brillante est la nébuleuse par réflexion NGC 2023, qui résulte de la diffusion par les poussières qu'elle contient de la lumière d'une étoile centrale. Cette photographie a été obtenue avec une caméra CCD à grand champ au foyer du télescope CFH.

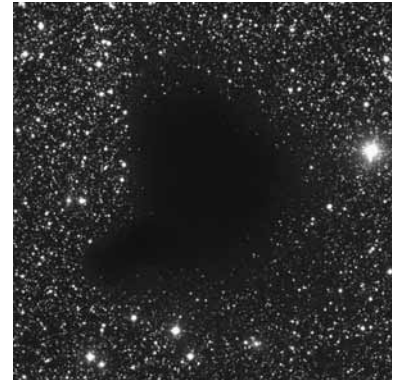


Figure 1.7. Les nuages sombres comme celui-ci, B 68, sont des objets caractéristiques de la matière interstellaire. Leur opacité est due aux poussières interstellaires, et le gaz qu'ils contiennent est principalement sous forme moléculaire. Ce sont les lieux où se forment les étoiles. Photographie obtenue avec le VLT de l'ESO.



Figure 1.8. Herschel fut parmi les premiers à tenter de se faire une idée de la forme de la Galaxie, à l'aide de comptages d'étoiles. Le résultat présenté dans cette figure est bien différent de la réalité. En particulier, il plaçait le Soleil presque au centre du système.

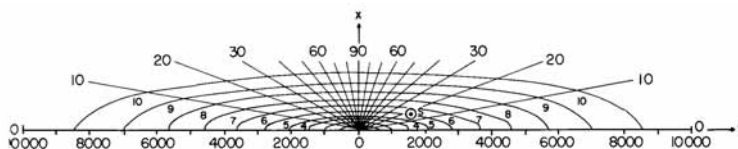


Figure 1.9. La Galaxie d'après Kapteyn en 1922⁷. Sa conception n'avait pas changé depuis 1908, elle était seulement devenue plus précise. Il supposait le Soleil S proche du centre de la Galaxie. Les courbes sont des lignes d'égale densité d'étoiles, la densité près du Soleil étant prise comme unité.

Enfin, on ignorait complètement au début du xx^e siècle s'il y avait d'autres galaxies en dehors de notre Galaxie, et à quoi elles pourraient bien ressembler si elles existaient vraiment. Certes des esprits hardis s'étaient aventurés à imaginer l'existence de tels « univers-îles » ; cependant personne ne parvenait vraiment à concevoir que les nébuleuses dont l'aristocrate anglais William Parsons, Earl of Rosse, avait découvert dans certains cas la structure spirale grâce à son télescope énorme pour l'époque, puissent être en fait des galaxies semblables à la nôtre, mais extrêmement éloignées. La notion d'Univers infini, ou du moins extrêmement grand, qui est aujourd'hui universellement admise, était encore purement théorique. La conception de l'Univers restait fortement anthropocentrique, et ne différait en essence de celle des Anciens que par un point, à dire vrai fondamental : la certitude que l'on avait de pouvoir connaître à distance les propriétés physiques et dynamiques des astres, contrairement à la célèbre affirmation d'Auguste Comte en 1842 selon laquelle une telle démarche serait à jamais impossible puisqu'on ne peut aller sur place⁸.

Malgré cet espoir, l'astrophysique naissante était encore dans le même état que la vieille astronomie d'avant Kepler et Newton : l'abondance de données et de faits récemment accumulés n'était pas intégrée dans des théories solides. Ce n'était pas la faute de l'astronomie, mais celle de la physique. Celle-ci n'avait pas encore énoncé, par exemple, la théorie atomique qui eût permis d'interpréter correctement le spectre des astres. Les seuls domaines développés de l'astronomie étaient évidemment ceux pour lesquels existaient les outils physiques et mathématiques nécessaires. D'autres devaient bientôt voir le jour : au cours de la période que nous abordons dans ce chapitre, nous verrons l'astronomie progresser parallèlement à la physique, avec laquelle elle a entretenu les liens les plus étroits pour leur bénéfice mutuel. Mais l'histoire des progrès de l'astronomie montre à quel point ils dépendent aussi de ceux des techniques.

Il ne m'est pas possible de retracer ici en détail l'ensemble de l'évolution de l'astronomie dans les années 1910-1950. Je désire seulement montrer quelles ont été les relations entre l'astronomie, la physique atomique et la physique nucléaire, et enfin comment, grâce au développement des grands instruments, l'homme a commencé à se faire une idée correcte des distances dans l'Univers.

Après 1910 : astronomie et physique atomique

L'interprétation du spectre des objets célestes

Dès la fin du xix^e siècle, on connaissait bien le spectre du Soleil et de divers types d'étoiles. On avait reconnu que certaines étoiles étaient semblables au Soleil, et qu'il existait des étoiles dont le spectre était différent (Fig. 1.10). On comprenait aussi que leur surface était plus ou

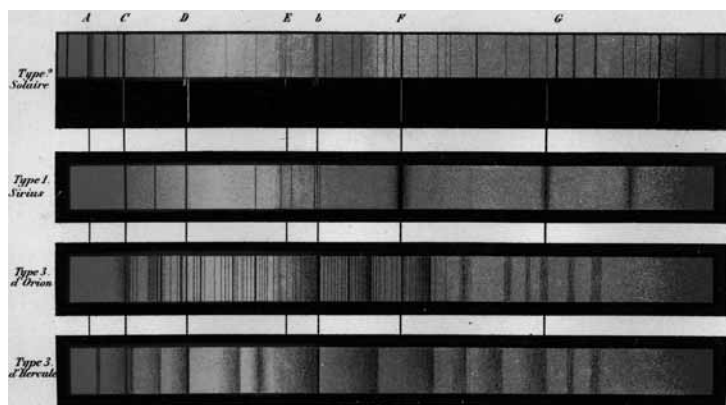


Figure 1.10. Quatre spectres stellaires typiques, dessinés dans les années 1870 par le Père Angelo Secchi d'après ses observations visuelles⁹. La longueur d'onde croît de la gauche vers la droite. Les raies principales sont repérées par des lettres, mais très peu étaient alors identifiées; les deux spectres du bas sont dominés par des bandes moléculaires. Du haut en bas : étoile de type solaire (classe spectrale G1); Sirius = α Canis Majoris (« Type 1 » = A1); Bételgeuse = α Orionis (« Type 3 d'Orion » = M1); α Herculis (« Type 3 d'Hercule » = M5). On ne savait pas encore alors que les étoiles différaient surtout par leur température de surface. Comparer à la figure 1.12.

moins chaude; l'opinion générale était que ces températures variées correspondaient à différents stades d'évolution le long d'une séquence unique, idée qui devait se révéler fautive et assez paralysante.

Les spectrographes, ainsi que les techniques photographiques nécessaires pour enregistrer les spectres, étaient déjà remarquablement perfectionnés. Par exemple, la construction dès 1887 d'excellents réseaux concaves par l'Américain Henry A. Rowland lui avait permis d'obtenir un spectre du Soleil où l'on dénombreait plus de 20 000 raies¹⁰. Ce qui manquait était une théorie des spectres permettant de s'y retrouver dans un tel imbroglio. On avait cependant remarqué au laboratoire que les raies spectrales des différents éléments n'étaient pas réparties au hasard, mais que leurs longueurs d'onde présentaient souvent des relations numériques simples; la première, concernant les raies de l'hydrogène, avait été découverte en 1885 par l'Allemand Johann Jakob Balmer¹¹. Par ailleurs, les raies sont souvent groupées en paires ou *doublets* (par exemple les fameuses raies D du sodium), en *triplets* ou en *multiplets*, d'une façon qui est liée à la position des éléments correspondants dans la classification périodique de Dimitri Mendeleïev. Mais on savait trop peu de choses sur la structure des atomes pour relier ces groupements spectraux aux propriétés atomiques.

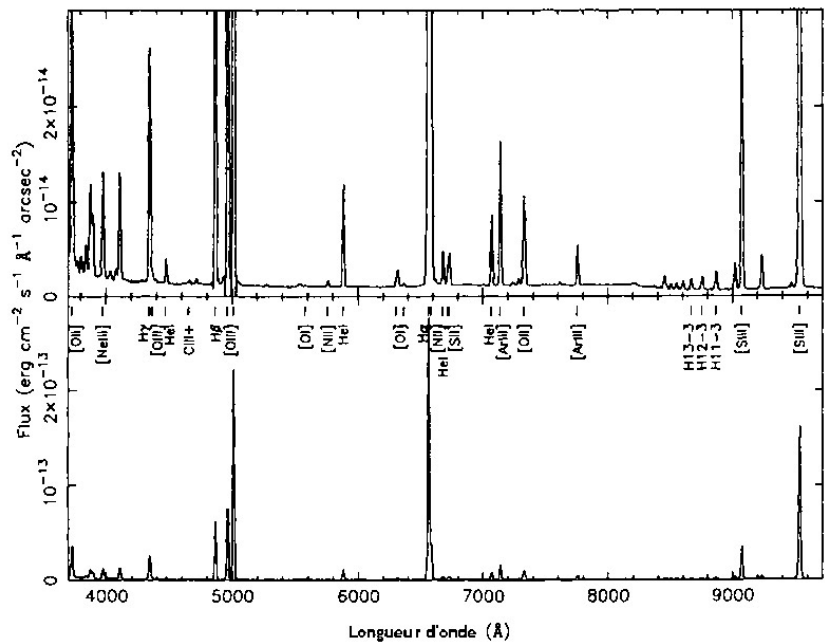
Le modèle atomique du Danois Niels Bohr, élaboré en 1913, devait fournir la clé permettant de déchiffrer le message codé contenu dans les spectres¹². Fondé sur la description de l'atome donnée deux ans auparavant par le Néo-Zélandais Ernest Rutherford sur la base de ses propres expériences — un noyau chargé positivement entouré d'électrons négatifs —, le modèle de Bohr incluait la théorie des quantas de Max Planck : chaque raie d'émission ou d'absorption est produite par la transition entre deux états atomiques d'énergie différente mais bien déterminée (quantifiée), et l'énergie des photons correspondants est égale à la différence entre l'énergie de ces deux états. Il devenait alors possible de réduire de nombreuses raies spectrales à quelques niveaux

d'énergie. Dès lors, les progrès de l'analyse des spectres astronomiques devaient suivre très étroitement ceux de la spectroscopie de laboratoire et de la théorie atomique, et éventuellement y contribuer.

Les raies interdites

Parmi les découvertes les plus remarquables dans ce domaine, il faut citer l'identification de raies observées dans divers objets astronomiques qui ne correspondent à aucune raie détectée au laboratoire. Telles sont par exemple certaines raies d'émission fort intenses visibles dans le spectre des nébuleuses gazeuses comme la nébuleuse d'Orion (Fig. 1.11), et que l'on avait initialement attribuées à un élément inconnu, le « nébulium ». C'est seulement en 1928 que le physicien américain Ira S. Bowen en donna l'explication¹³ : il s'agit tout simplement de raies d'éléments et d'ions très abondants que l'on s'attend à trouver dans le gaz interstellaire ionisé, comme l'oxygène ionisé une ou deux fois, l'azote ionisé une fois, etc., mais ces raies correspondent à des transitions très peu probables, dites avec un peu d'exagération *transitions interdites*. Au laboratoire, les atomes ou ions excités perdent leur énergie par d'autres processus que par l'émission de ces raies, notamment en échangeant de l'énergie avec des électrons ou d'autres ions avec lesquels ils entrent en collision. Dans le milieu interstellaire, cependant, la densité est généralement si faible que ces collisions sont fort rares, si bien que les atomes et ions en question, pour perdre leur excès d'énergie, ne peuvent qu'émettre ces raies interdites qui sont alors observables.

Figure 1.11. Spectre de la nébuleuse d'Orion¹⁴. L'intensité est portée en fonction de la longueur d'onde. En bas, le spectre est présenté de manière à faire voir les raies fortes, et en haut pour mettre en évidence les raies faibles. Les raies interdites sont identifiées entre crochets, les autres sont des raies de recombinaison de l'hydrogène, de l'hélium et du carbone. Conformément à l'usage des astronomes, les ions sont repérés par des chiffres romains : par exemple, OIII symbolise l'ion oxygène deux fois ionisé O^{++} , OII l'ion une fois ionisé O^+ et OI l'atome neutre O, parfois écrit O^0 . Certaines raies interdites comme [OIII] à 5 007 Å (500,7 nanomètres) sont aussi intenses que les raies de recombinaison les plus fortes.



Cet exemple illustre bien l'intérêt qu'ont les observations astronomiques pour compléter les expériences de laboratoire : l'étude astronomique des raies interdites a en effet beaucoup apporté à notre connaissance des atomes. D'autres raies interdites, émises cette fois par la couronne du Soleil, c'est-à-dire par la haute atmosphère très chaude et très ténue de l'astre, ont résisté plus longtemps à l'identification : elle n'a été réalisée qu'en 1941 par le Suédois Bengt Edlén¹⁵, qui se servait d'indications fournies par Walter Grotrian¹⁶. Ces raies du « coronium », découvertes dès 1870, sont des raies interdites du fer, du calcium et du nickel très fortement ionisés, auxquels il ne reste plus que quelques électrons par atome. La France est malheureusement restée à l'écart de la plupart des progrès théoriques liés à la spectroscopie astronomique, malgré une bonne position sur le plan de l'instrumentation ; presque tout s'est fait aux États-Unis, en Angleterre, ainsi qu'en Allemagne surtout avant la prise de pouvoir par Hitler, autour de remarquables écoles de physiciens dont il n'existait guère l'équivalent dans notre pays.

La formation des raies spectrales et la composition chimique des étoiles

C'est également dans ces pays que fut élaborée la théorie de la formation des raies spectrales. En Allemagne, Gustav Kirchhoff avait déjà montré en 1859 que les éléments contenus dans un gaz froid produisent des raies d'absorption dans le spectre continu émis par un corps plus chaud devant lequel il est interposé ; au contraire, si le gaz est plus chaud que le fond, les raies apparaissent en émission¹⁷. Cette idée fut bientôt appliquée au Soleil : on pensa que puisque les raies solaires étaient des raies d'absorption, elles devaient être produites dans une couche gazeuse relativement froide surmontant des couches plus chaudes où se formait le spectre continu. Cette explication devait se révéler simpliste et même fausse.

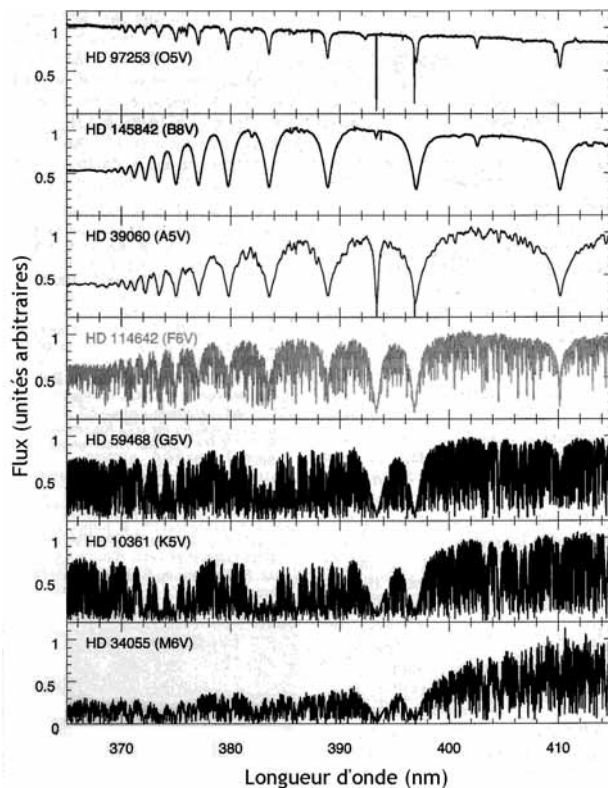
La construction d'un modèle satisfaisant de rayonnement du Soleil fut une entreprise de longue haleine, commencée en 1906 par l'Allemand Karl Schwarzschild, qui introduisit le principe de l'équilibre radiatif¹⁸ : la température en chaque élément de l'atmosphère solaire est déterminée par ce qu'il absorbe du rayonnement en provenance de toutes les régions voisines, lequel lui apporte une énergie qui compense celle du rayonnement qu'il émet lui-même. Pour aller plus loin, il fallut établir les lois du transfert de rayonnement : ce fut l'œuvre de Schwarzschild lui-même (1910), puis d'Albert Einstein¹⁹ en 1917^a. La théorie du rayonnement solaire put alors atteindre un grand degré de perfectionnement, grâce entre autres à l'Indien Meghnad Saha, à Karl Schwarzschild, et aux Anglais Edward A. Milne et Sir Arthur S. Eddington ; ce dernier nom est l'un des plus grands de l'astronomie contemporaine.

^a Einstein découvrit notamment, par un raisonnement purement phénoménologique, l'existence de l'émission induite, qui est à la base du fonctionnement des lasers et des masers inventés bien plus tard.

Leur travail (1920-1923) conduisit à une conception totalement renouvelée de l'atmosphère du Soleil et des étoiles, et à la compréhension de la formation des raies spectrales. Le rayonnement continu et les raies apparaissent comme le résultat du transfert du rayonnement dans une grande épaisseur de l'atmosphère, sans qu'on puisse assigner à la formation du continu et des raies une profondeur particulière. Les raies se forment par diffusion : les atomes d'une certaine couche absorbent dans une de leurs transitions le rayonnement provenant principalement de couches plus profondes où il est plus intense que dans les couches plus superficielles, et le ré-émettent dans cette même transition dans toutes les directions, autant vers l'extérieur que vers l'intérieur. Le rayonnement vers l'extérieur, celui que nous pouvons observer, est donc plus faible que celui qui existe dans les couches intérieures ; il en résulte à la sortie de l'atmosphère un affaiblissement du rayonnement à la longueur d'onde de la transition, et la raie apparaît en absorption (Figs. 1.10 et 1.12). Les raies d'absorption du Soleil et des étoiles ne correspondent donc ni à une décroissance de la température ni à une décroissance de la densité, mais apparaissent simplement parce que l'atmosphère est ouverte vers l'extérieur en ce qui concerne le rayonnement.

Beaucoup de travail restait à faire pour compléter ce tableau. En particulier, il fallait encore expliquer l'origine de la largeur des raies spectrales ; ici encore, les progrès de l'astronomie sont liés étroitement

Figure 1.12. Spectres d'étoiles de différents types obtenus avec le VLT de l'ESO entre 360 et 420 nanomètres de longueur d'onde. Les étoiles sont de plus en plus chaudes de bas en haut, avec un spectre de moins en moins riche en raies. Celui des étoiles froides est dominé par des bandes moléculaires. Dans le spectre du haut, les deux raies d'absorption étroites à 393,4 et 396,8 nm sont dues au calcium ionisé interstellaire. Comparer à la figure 1.10.



à ceux de la physique. On devait enfin utiliser quantitativement les intensités des raies des divers éléments pour mesurer leurs abondances respectives dans l'atmosphère du Soleil et des étoiles. Beaucoup d'astronomes y ont participé, mais il faut citer surtout ici le nom de l'Allemand Albrecht Unsöld²⁰. Le fait le plus remarquable qui émerge de leurs travaux est l'abondance considérable de l'hydrogène dans le Soleil et les étoiles : en gros, 90 atomes sur 100 sont des atomes d'hydrogène, 8 des atomes d'hélium et 1 ou 2 des atomes d'éléments plus lourds, où dominent le carbone, l'azote, l'oxygène, le silicium et le fer. Les différences considérables qui existent entre les spectres des étoiles sont surtout dues aux différences de conditions physiques qui y règnent (la température joue un rôle prédominant) ; il existe cependant d'une étoile à l'autre des différences de composition chimique.

D'autres progrès sur le Soleil

Une dernière découverte que je veux mentionner à propos du Soleil date de 1939 et est due à l'Allemand Rupert Wildt. Il s'agit de l'origine physique du rayonnement continu du Soleil et de nombreuses étoiles, qui était restée mystérieuse malgré l'état très avancé des idées sur l'atmosphère solaire. Wildt a montré que les atomes d'hydrogène, qui sont composés d'un proton et d'un électron, peuvent capturer et relâcher un deuxième électron²¹. L'énergie nécessaire pour cette capture ou cette libération se retrouve sous la forme d'un rayonnement continu qui s'étend de l'ultraviolet à l'infrarouge. Ces processus sont peu fréquents, mais il y a tellement d'hydrogène dans l'atmosphère du Soleil et des étoiles qu'ils y deviennent globalement très importants. N'est-il pas curieux que le rayonnement du Soleil soit principalement émis par ce phénomène somme toute accidentel et secondaire ?

Je ne parlerai guère ici de l'activité du Soleil, de ses taches, connues depuis Galilée, et de ses éruptions découvertes en 1859 par l'anglais Richard Carrington et redécouvertes en 1926 par George E. Hale au Mont Wilson en Californie. En effet, tous ces phénomènes ont relevé jusqu'en 1950 du domaine de la pure description. Tout ce qu'on en savait jusqu'aux environs de 1950 est qu'ils avaient quelque chose à voir avec le champ magnétique solaire. Ce dernier avait été découvert dès 1908 par le même Hale²² — une intéressante application de l'effet de dédoublement des raies spectrales par un champ magnétique, mis en évidence au laboratoire douze ans auparavant par le Hollandais Pieter Zeeman. Ce qui me paraît intéressant du point de vue de l'Histoire des sciences au cours de la période 1910-1950, dans le domaine de la spectroscopie astronomique, est qu'elle a vu se réaliser un rêve : la détermination à distance, à partir de la seule observation, des propriétés physiques des astres et de leur composition. Cette idée qui nous paraît aujourd'hui naturelle a rempli d'émerveillement les contemporains.

La physique des nébuleuses gazeuses

Cet émerveillement s'est accru lorsqu'on a réalisé la variété et l'exotisme des conditions astrophysiques, ce qui a d'ailleurs rendu difficile le diagnostic même de ces conditions. Alors que les atmosphères stellaires montrent certes des températures élevées, mais des densités « normales », le milieu interstellaire n'a commencé à être compris que beaucoup plus tard, tout simplement parce sa densité est bien plus faible que celle des meilleurs vides réalisables au laboratoire : nous avons vu que c'est pour cette raison que les nébuleuses interstellaires ionisées émettent des raies interdites pratiquement inobservables dans les conditions du laboratoire. Après les travaux de pionnier du Hollandais Herman Zanstra²³ et du Danois Bengt Strömgren²⁴ qui ont montré comment le rayonnement ultraviolet d'étoiles très chaudes ionisait le gaz de ces nébuleuses, c'est à l'Américain Donald H. Menzel que l'on doit, dans les années 1937-1945, les bases approfondies de la théorie des nébuleuses gazeuses et de leur émission de raies « normales » (les raies non interdites qui proviennent de la recombinaison de l'ion hydrogène ou hélium avec un électron)²⁵. Quant à l'émission des raies interdites, elle n'a été comprise à fond, et une théorie quantitative élaborée, que par le groupe de Michael J. Seaton à Londres, après la dernière guerre mondiale.

Cette lenteur dans la construction des modèles de nébuleuses gazeuses, dont la théorie est pourtant plus simple par beaucoup d'aspects que celle des atmosphères stellaires, tient entièrement à ce qu'elle fait intervenir une notion nouvelle, celle d'*écarts à l'équilibre thermodynamique*. Dans les laboratoires terrestres, où la densité est relativement grande et le champ de rayonnement habituellement plutôt faible, la distribution des atomes ou des ions dans leurs différents niveaux d'énergie est presque toujours dominée par les collisions avec les autres particules du milieu et avec les parois : c'est l'équilibre thermodynamique au sens strict, ou *équilibre collisionnel*. Dans ce cas, les populations des divers niveaux d'énergie ne dépendent que de la température et des propriétés de l'atome en question, selon une loi énoncée dès 1896 par l'Autrichien Ludwig Boltzmann dans un contexte plus général²⁶ (Boltzmann ignorait alors l'existence de niveaux d'énergie discrets dans les atomes).

Dans l'atmosphère solaire, la situation est inverse, mais également familière aux physiciens depuis Kirchhoff : le rayonnement ambiant est si intense que la population des niveaux d'énergie est entièrement dominée par les échanges d'énergie avec ce rayonnement aux longueurs d'onde des transitions entre ces niveaux. Il y a cette fois un *équilibre radiatif*. Dans les nébuleuses gazeuses — et dans le gaz interstellaire en général — la densité est très faible, donc il y a peu de collisions, et le champ de rayonnement est également faible ; leurs effets sur les populations des niveaux d'énergie atomiques ou ioniques sont du même ordre de grandeur, sans que l'un ou l'autre domine totalement

Liste des crédits

- American Astronomical Society : Figs. 1.9, 1.11, 1.22, 1.24, 1.25, 2.3, 2.32, 2.35, 2.36, 2.39, 3.1, 3.8, 3.13, 3.14, 3.15, 4.3, 6.30, 6.36, 6.38, 6.39, 6.40, 7.3, 7.4, 7.10, 7.11, 7.14, 7.18, 7.19, 7.20, 7.21, 7.23, 7.26, 7.27, A2.6
- American Astronomical Society, NRAO/AUI and John Hibbard : Fig. 3.2
- American Physical Society : Fig. 6.26
- Annual Reviews (www.annualreviews.org) : Figs. 2.34, 3.17
- ASTRON : Fig. 8.4
- Astronomical Society of Japan : Fig. 8.3
- John Bahcall, Mike Disney and NASA : Fig. 7.13
- Bibliothèque de l'Observatoire de Paris : Figs. 1.2, 1.8, 1.10, 2.37
- Michel Boer, CESR : Fig. 5.24
- Brookhaven National Laboratory : Fig. 4.11
- Canada-France-Hawaii telescope/J.-C. Cuillandre/Coelum : Figs. 1.3, 1.6, 2.21
- CSIRO : Figs. 2.5, 2.9, 2.12, 2.15, 2.16, 4.2
- J.-C. Cuillandre (CFHT) : Fig. 3.11
- Dominion Radio Astronomy Observatory/NRC : Fig. 5.2
- European Southern Observatory : Couverture, Figs. 1.7, 1.12, 2.17, 2.20, 2.26, 2.29, 2.38, 3.7, 3.12, 4.6, 4.13, 5.4, 5.19, 5.20, 6.10, 6.17, 6.19, 6.21, 6.28, 6.32, 6.33, 6.37, 7.1, 7.2, 7.9, 7.16, 7.24, 7.28, 7.29, 8.1, 8.2, A2.1, A2.4, A2.5
- R. Evans, J. Trauger, H. Hammel, HST Comet Science Team, NASA : Fig. 6.4
- EVN Consortium : Fig. 3.6
- GIOTTO Consortium : Fig. 6.12
- GSFC/NASA : Fig. 5.11
- The Hess Collaboration : Fig. 5.25
- Hubble Space Telescope, C. Burrows, J. Hester, J. Morse : Fig. 6.16
- Hubble Space Telescope, A. Schultz (CSC/STScI and NASA) : Fig. 6.14
- The Huntington Library of San Marino, California : Fig. 1.19
- IRAM : Fig. 4.5
- IRAM (Photo R. Mausberger) : Fig. 4.4
- Infrared Processing and Analysis Center, Caltech/JPL : Figs. 4.7, 4.8, 4.9, 4.10
- ISO consortium (ESA/NASA) : Figs. 5.5, 5.6, 6.34
- IUE Consortium (ESA/NASA) : Fig. 3.16
- Alain Maury : Fig. 2.1
- M.J. McCaughrean, C.R. O'Dell, NASA : Fig. 6.15
- Musée des arts et métiers/CNAM : Fig. 1.1
- NAIC Arecibo Observatory : Fig. 3.9
- NASA and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA) : Figs. 1.4, 2.28, 6.29, 7.7, 7.8
- NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI, ST-ECF) : Fig. A2.2
- NASA/CXC/ASU/J. Hester et al. : Fig. 2.19
- NASA, ESA, S. Beckwith (STScI) and The HUDF Team : Fig. 7.31
- NASA, Galileo project : Fig. 6.1
- NASA, Mars Global Surveyor Project : Fig. 6.9
- NASA, Voyager project : Fig. 6.2
- NASA/IPAC Extragalactic Data Base : Fig. 2.31
- NASA/JPL-Caltech/B. Brandl : Fig. 5.7
- NASA/JPL/Space Science Institute : Figs. 6.5, 6.6
- National Center for Radio Astrophysics : Fig. 5.3
- National Radio Astronomy Observatory/AUI : Figs. 2.18, 2.22, 5.1
- National Radio Astronomy Observatory/AUI (Photo D. Finley) : Fig. 4.1
- Nature : Figs. 2.14, 2.30, 6.18, 7.15, 7.30
- Northrop Grumman Space Technology : Fig. 8.5
- NSSDC, NASA/JPL : Fig. 6.8
- Observatoire de Paris : Figs. 2.4, 2.7, 2.8, 2.13, 5.18, 6.22
- C.R. O'Dell/Rice University, NASA : Fig. 1.5
- The Planetary Society : Fig. 6.7

V. Romanenko, SAO : Figs. 3.3, 3.10

Royal Astronomical Society : Figs. 1.13, 1.21, 2.24

Royal Observatory Edinburgh : Fig. 5.17

Royal Observatory Edinburgh, UK Schmidt Telescope :
Fig. 1.23

Francois Schweitzer (CIW/DTM), B. Whitmore (STScI),
NASA : Fig. 7.6

SOHO/EIT consortium (ESA/NASA) : Figs. 6.23, 6.24

John Spencer (Lowell Observatory) and NASA : Fig. 6.3

Springer Verlag : Fig. A2.3

Stardust Team NASA/JPL : Fig. 6.13

A. Stern, M. Buie, NASA, ESA/HST : Fig. 6.11

STScI, Arturo Gomez : Fig. 4.12

Sylvie Vauclair : Fig. 6.25

John Webb : Fig. 7.17

www.nordeifel.de : Fig. 3.5

www.skynet.com.pl : Fig. 2.11

XMM consortium (ESA/NASA) : Figs. 5.21, 5.22