

L'HOMME FACE AUX ÉTOILES

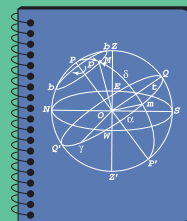
Daniel .WOERHLING

Daniel Woerhling propose dans ce fascicule un aperçu de l'évolution de la compréhension humaine des étoiles. Il explore l'histoire de l'astronomie, depuis les premières observations des constellations jusqu'au développement de la spectroscopie et de l'astrophysique. Il détaille comment les étoiles, initialement cartographiées comme de simples points lumineux, sont devenues des clés pour percer les secrets de la matière et de l'Univers, abordant des concepts tels que la fusion nucléaire, les naines blanches, les supernovae, les pulsars les trous noirs et le Big Bang, et insistant sur l'importance cruciale de l'observation scientifique dans ces découvertes.



**SOCIÉTÉ
d'ASTRONOMIE
de NANTES**

Société Scientifique d'Éducation Populaire agréée Jeunesse et Sports
35, boulevard Louis Millet - 44300 NANTES - Tél. 02 40 68 91 20 - Fax 02 40 93 81 23
Internet : www.san.asso.fr - E-mail : san@san-fr.com



N° 34

L'HOMME FACE AUX ÉTOILES

Daniel WOEHLING



Les Cahiers de la SAN

SOMMAIRE

Introduction	1
<i>Le rôle des étoiles dans l'histoire de l'astronomie</i>	1
Les constellations et les premières représentations du ciel	2
<i>Les premiers catalogues d'étoiles</i>	3
<i>Désigner les étoiles : l'apparition de la nomenclature</i>	4
La naissance de l'astrophysique	5
<i>L'éclat des étoiles</i>	5
<i>La photométrie stellaire</i>	6
L'aventure de la spectroscopie	7
<i>La lumière striée</i>	8
<i>L'évolution du système de classes d'étoiles</i>	9
<i>William, Henry et Anna Draper</i>	9
<i>L'observatoire de Harvard entre en scène</i>	10
<i>Spectre et magnitude</i>	11
<i>Le catalogue de Harvard (suite)</i>	12
<i>L'émergence du diagramme HR</i>	12
<i>Du Diagramme HR à l'astrophysique</i>	13
Vers la cosmologie	14
<i>La composition des étoiles et le modèle de fusion nucléaire</i>	14
<i>L'évolution en naine blanche</i>	15
<i>À l'autre extrémité, les supernovae</i>	15
<i>Petite incursion vers le Big Bang</i>	16
<i>Confirmation du modèle de vie stellaire</i>	17
<i>L'aventure des pulsars</i>	17
<i>Quasars et trous noirs</i>	18
Autres études stellaires	18
<i>Parallaxes trigonométriques</i>	18
<i>Parallaxe dynamique</i>	20
<i>Parallaxe photométrique</i>	20
<i>Parallaxe spectroscopique</i>	20
<i>Étude de la taille des étoiles</i>	20
<i>Détermination des masses</i>	21
<i>Les étoiles doubles</i>	21
<i>Les étoiles variables</i>	21
Conclusion	22
Bibliographie	23

Bibliographie

- Anon. *Les étoiles, naissance, observation, évolution*. Ed. Atlas 1984
Anon. *Les étoiles*, In : *Voyage à travers l'Univers*. Time-Life 1989
Boisshot A. *Astronomie*. Encyclopaedia Universalis, Vol. 2, pp. 686-696
Boisshot A. *Étoiles*. Encyclopaedia Universalis, Vol. 6, pp. 714-719
Boisshot A. *Catalogues astronomiques*. Encyclopaedia Universalis, Vol. 3, p. 1049
Bianucci P. *Étoile par étoile*. Bordas 1988
Gautier J.F. *L'Aventure des Sciences ? Du May 1988*
Gautier J.F. *L'Univers existe-t-il ? Actes Sud*. 1994
Gourgoulhon E. *La supernovae de mars 1993*. Pour la Science, n° 193, août 1993.
Liais E.M.M. *L'espace céleste*. Garnier
Massain R. *Chimie et chimistes*. Magnard 1966
Hergé *L'étoile mystérieuse*. Hergé
Secchi A. *Les étoiles*. Germer Baillière 1879

oOo

Remerciements : ce texte est une version remaniée d'un article paru dans la revue *Astronomie en Touraine et Centre-Ouest*, numéro spécial N° 45, Journées Techniques de Chinon, 22-23 octobre 1994, Thème : "Les Étoiles".
Publié avec l'aimable autorisation de la revue.

© Société d'Astronomie de Nantes, 1998

Le sous-titre de cet exposé est un hommage au dernier film de Maurice et Katia KRAFFT, "L'Homme face aux volcans" lequel, loin de se limiter au combat des hommes contre les forces de la nature, montre le progrès des connaissances qui en a découlé et tout l'amour de l'Homme pour cette expression de la vie de notre planète.

Dans le domaine de l'astronomie, si la confrontation est moins dramatique, elle n'en reste pas moins émouvante, ne serait-ce que par l'énormité des énergies en présence et le lent travail d'investigation scientifique qu'il a fallu accomplir pour percer les secrets de la nature et comprendre ses caprices.

L'HISTOIRE DE L'ASTROPHYSIQUE

Ou 'L'Homme face aux Étoiles'

///

Le mot "étoile" évoque habituellement deux choses différentes, appartenant à deux ensembles sémantiques ou deux domaines expérimentaux différents : il désigne d'abord un objet scientifique, physique, une masse gazeuse, siège de phénomènes matériels intenses, réactions de fusion nucléaire, rayonnements, états-limite de la matière ; mais en désignant la principale composante visible de l'univers, il est devenu aussi le symbole même de cet univers et par extension, celui de l'astronomie elle-même.

*Les étoiles,
symbole de
l'astronomie*

Que l'homme fut de tout temps fasciné par la voûte céleste, cela paraît naturel. Si cette propension, qui procède de son sens esthétique, l'entraîna historiquement dans des activités purement contemplatives, elle eut aussi pour principal effet de susciter chez lui des interrogations fondamentales qui furent à l'origine de l'astronomie.

Mais contrairement à l'émotion esthétique ou mystique, l'investigation scientifique s'apparente plutôt à une confrontation entre l'homme et la nature, entre une réalité objective et les pièges de son intuition. S'agissant de l'objet "étoile", celle-ci s'inscrit dans une problématique scientifique qui tend à canaliser toute interrogation possible dans un réseau codifié de lois lesquelles, en l'occurrence, sont celles de la physique. En revanche, dès qu'il s'aventure à dissenter sur l'"Univers" pris comme totalité, l'homme est aux prises avec un concept qui n'est plus du domaine de la science, mais appartient à celui des croyances, où il retrouve ses *a priori*, et cela même dans les grands modèles cosmologiques modernes.

Historiquement, l'approche cosmologique préexiste à l'astrophysique. Mais il est révélateur que ce soit cette dernière, relevant de l'approche scientifique, qui ait permis le progrès des connaissances sur l'univers (que l'on devrait appeler, pour éviter toute confusion, le "monde observable" ou l'*univers observable*) et accessoirement l'évolution de la cosmologie elle-même.

Le rôle des étoiles dans l'histoire de l'astronomie

Dans cette longue quête pour la connaissance, les étoiles vont jouer un rôle majeur. C'est par leur étude que l'on parviendra à sonder la composition et la structure de l'univers observable, et jusqu'à pénétrer dans le cœur même de la matière. On trouvera les étoiles d'abord associées à l'astrophysique et à la physique nucléaire, puis à la mesure des distances, au sein de la galaxie, puis extragalactiques. Elles président enfin à l'explication des trous noirs et quasars.

Systèmes-clé omniprésents dans l'histoire de la matière, les étoiles ne constituent pas un objet d'étude parmi d'autres. Elles sont au cœur de la science astronomique, matériellement et historiquement, et peuvent être considérées comme l'objet astronomique par excellence. L'étude des étoiles jalonne toute l'histoire de l'astronomie.

L'évocation des grandes composantes de cette histoire est indissociable de celle de leur émergence. Par ailleurs, l'échelle des temps en astronomie est souvent longue en comparaison de la vie humaine, d'où la nécessité de comparer des observations du passé à celles d'aujourd'hui. L'évocation de l'astronomie stellaire intègre ainsi d'emblée la dimension historique.

Mais alors que les étoiles constituent de loin la majorité des astres lumineux (environ 7000 d'entre elles sont visibles à l'œil nu), elles sont beaucoup trop loin pour que les télescopes accèdent directement à leur structure, si l'on exclut le cas particulier de la mesure directe des diamètres par interférométrie et celui de la photographie récente de la surface de Bételgeuse par l'équipe de Labeyrie et Querci au *CERGA*.

Une
histoire
du
rayonne-
ment

C'est ainsi l'étude du rayonnement qui constitue l'accès privilégié à la connaissance des étoiles. Il se trouve qu'aux températures régnant à la surface des étoiles, le maximum d'émission a lieu dans la partie visible du spectre. Jusqu'à ces dernières années, c'était la seule partie observable (toutes les autres ondes, sauf les ondes radio, sont trop faibles pour être détectées, absorbées par l'atmosphère). Mais depuis quelques années, grâce aux premières fusées et satellites, l'observation des étoiles se fait aussi dans le domaine ultraviolet, infrarouge ou celui des rayons X.

///

1. Les constellations et les premières représentations du ciel

Conformément à toute démarche cognitive, l'homme a d'abord cherché à se repérer dans le ciel, à y reconnaître des régularités, puis à ordonner ce qu'il voyait. Son premier travail renvoie à une *topographie*. Il y a des milliers d'années, l'observation des astres servait aussi à l'homme à marquer des étapes dans le déroulement du temps. Quelque 52 constellations étaient déjà identifiées par les Chaldéens et Mésopotamiens de 2800 à 600 av. JC environ, en particulier les 12 du zodiaque qui punctuaient les saisons. Leur nom rappelle l'activité dominante d'un peuple éleveur et cultivateur.

Parallèlement, cette régularité, qui ne pouvait être que l'oeuvre de forces surnaturelles, allait alimenter la propension mystique de l'homme et accréditer une composante irrationnelle dans laquelle l'astrologie s'engouffrera.

Les
premiers
astrono-
mes

La division en douze signes du zodiaque se retrouve chez les Égyptiens, Babyloniens, Perses, Indiens. L'un des premiers planisphères fut trouvé par un officier de Napoléon parmi les ruines du temple d'Isis à Dendérah et fut daté de l'an 1800 avant notre ère. Hériade (VII^e siècle avant notre ère) et Homère (IX^e siècle) citaient cinq noms de constellations : Pléiades, Hyades, Grande Ourse, Bouvier et Orion. Cette dernière apparaît dans la Bible avec les Hyades. Vers 450, Anaxagore de Clazomènes émit l'hypothèse que les étoiles rayonnent grâce au frottement avec l'éther, contrairement à la Terre, à la Lune ou aux planètes qui ne sont pour lui que des pierres.

Récemment, Michael Owenden, ayant étudié la répartition des constellations classiques, a montré que le rayon de la zone dépourvue de constellations était de 36°

Conclusion

Il resterait beaucoup de choses à dire sur les étoiles elles-mêmes ou les méthodes d'observation. On aurait encore pu décrire l'ingéniosité de l'homme à se repérer en mer grâce aux étoiles, ou consacrer un chapitre à l'origine de leurs noms pittoresques. Cet article n'a pas la prétention d'être exhaustif sur un sujet aussi vaste, mais de montrer par quelques exemples révélateurs comment l'observation stellaire a permis l'établissement progressif des connaissances fondamentales en astronomie.

Car c'est essentiellement par leur contribution inestimable à la connaissance de la matière et de la structure de l'univers que les étoiles "brillent" au fronton de la science. Ce savoir fut acquis patiemment par la convergence de méthodes, de savoirs et de savoir-faire très divers, mais il est révélateur que ce soit l'observation, et la plus fine, couplée à la précision et la rigueur, qui soit au coeur de cette investigation, et omniprésente. Tout se passe comme si l'inventivité théorique qui accompagna les grandes étapes de cette ascension, n'avait qu'un rôle secondaire, et devait attendre d'être fécondée par l'observation. Et quand elle prend les devants, c'est encore à l'observation qu'elle demande ses confirmations. Pour autant, il ne s'agit pas de minimiser l'importance de l'investigation théorique et de tomber dans le concept positiviste réducteur de la théorie comme simple mise en forme des résultats d'expérience. Mais l'histoire de l'étude des étoiles doit nous rappeler le rôle essentiel de l'observation dans le progrès des connaissances.

Il est intéressant à ce sujet de constater qu'à notre époque, où l'homme dispose de moyens d'investigation gigantesques, ces derniers, pour des raisons d'accessibilité, jouent de moins en moins leur rôle d'initiateurs de l'imagination humaine et sont de plus en plus dévolus à confirmer quelques modèles théoriques dominants. Par ailleurs, la puissance des instruments les condamne à une utilisation très ciblée sur des objets autrement inaccessibles, délaissant des pans entiers du ciel tandis que les contraintes de la Recherche excluent toute observation répétitive.

Un champ considérable s'ouvre alors aux astronomes amateurs, libres de toute échéance, pourvus d'instruments faciles à mettre en oeuvre et pouvant s'occuper en toute quiétude d'objets délaissés. C'est ainsi que les duplicités suivent les fameux "couples négligés", que les variabilistes se choisissent des étoiles non encore étudiées et affinent les relations. Les mêmes ne disposent-ils pas de résultats obtenus par les astronomes de l'ex-URSS en raison justement de la difficulté de ces derniers à accéder à de gros instruments ?

L'image de l'astronomie d'amateurs est à un tournant. Jusque-là, on pouvait penser qu'hormis le plaisir de la contemplation ou de la satisfaction d'un "hobby", dans le meilleur des cas, les astronomes amateurs n'avaient comme seul atout leur nombre et comme seul horizon l'accumulation de données en prestataires zélés et bénévoles de la recherche instituée.

Il n'en est rien et les amateurs, à l'image de leurs maîtres du passé, sont à même de mener des recherches originales. Et s'ils ont quelquefois l'impression d'être exclus des grands débats contemporains qui agitent les cénacles autorisés, qu'ils se consolent en songeant aux pièges de telles spéculations et en se sentant les véritables héritiers de certains grands novateurs du passé, de ceux que Paul Couteau appelle "Les fous du ciel" ! Et l'astronomie amateurs ne recèle-t-elle pas elle aussi quelques "stars" ?

On ne rappellera que les principaux résultats en rapport avec l'évolution du modèle d'évolution stellaire et d'univers.

5.7. Les étoiles doubles (fig. 13)

En 1827, W. Struve examinait 120 000 étoiles et recensait plus de 1000 couples dont un grand nombre sont des couples physiques (binaires). Les systèmes binaires permettent d'accéder directement à la masse des étoiles et à leur distance.



Fig. 13. Étoiles doubles

5.8. Les étoiles variables

On distingue grossièrement d'une part les variables irrégulières et d'autre part les variables régulières. Les premières se signalent par de brusques variations d'éclat, peu durables. Il peut s'agir d'étoiles en formation (notamment les étoiles T-Tauri), de variables éruptives, novae et supernovae (ces dernières constituant cependant une classe très particulière - voir plus haut).

Un grand nombre de variables cependant sont périodiques (variables d'amas, céphéides, variables à longue période, RR Lyrae). La relation période-luminosité fut trouvée en 1912 par Henrietta Leavitt, par l'étude des nuages de Magellan. Rappelons que la "variabilité" n'est en fait que l'expression de la vie des étoiles, et probablement que si nous en étions aussi proches que du Soleil, toute étoile serait "variable" à nos yeux.

///

et que son centre coïncidait avec la position du prolongement du pôle sud en 2500 avant notre ère.

Par ailleurs, s'en référant au poème d'Aratos, il y trouve 34 phrases concernant l'équateur et les cercles des tropiques ; en tenant compte du mouvement de précession, 33 de ces affirmations sont exactes si elles se réfèrent à l'an 2600 av. JC (± 800 ans).

Il en conclut que les constellations classiques furent conçues autour de l'an 2500 av. JC par un peuple qui vivait à la latitude 36° au nord de l'équateur. Parmi les "candidats", la civilisation Minoëenne, de plus grands navigateurs, est la plus plausible. Détruite par la colossale éruption volcanique du Santorin, elle est sans doute à l'origine du mythe de l'Atlantide.

L'une des plus anciennes représentations concrètes du ciel est une carte du ciel sculptée sur un globe, l'*Atlas Farnèse* (fig. 1) datant du II^e siècle avant notre ère, et qui reproduit 42 constellations. Ce globe pourrait provenir plus ou moins directement de ce qu'on appelle la "sphère d'Eudoxe" et qui n'a jamais été retrouvée. Les écrits d'Eudoxe ayant trait à l'astronomie ("Les phénomènes" et "Le Miroir") datant de l'an 370 avant notre ère ont semble-t-il été perdus. La fameuse "sphère" aurait elle-même été inspirée des vestiges de la civilisation Minoëenne.

L'oeuvre d'Eudoxe est le premier travail vraiment scientifique de l'antiquité sur lequel allait se fonder le système géocentrique d'Aristote et de Ptolémée. Lorsque Aratos de Soles écrit "Les Phénomènes" et "Les Pronostics" à l'usage des navigateurs et des agriculteurs, les constellations étaient déjà bien admises et il avait trouvé sa source dans les écrits d'Eudoxe.



Fig. 1. Atlas farnèse (musée de Naples)

1.1 Les premiers catalogues d'étoiles

Les constellations d'aujourd'hui sont issues de l'*Almageste* de Ptolémée d'Alexandrie (137 après JC), vaste compilation de connaissances de l'époque et des anciens. On y revient au système géocentrique, alors que dès 200 av. JC, l'hypothèse héliocentrique avait été formulée. De toutes les sphères célestes concentriques, la dernière est celle, pure et immuable des étoiles. 48 constellations et un millier d'étoiles (1028 exactement) y sont décrites. Il s'agit en fait d'une mise à jour du catalogue d'Hipparque de Nicée, compilé trois siècles auparavant (150 av. JC) pour définir la position de 1022 étoiles et 49 constellations (le plus ancien catalogue d'étoiles connu).

Hipparque avait entre autres découvert le mouvement de précession de la Terre, oscillation de l'axe de rotation de période 25 600 ans (actuellement 25 820 ans) entraînant un changement de position des pôles célestes.

La plus vieille carte du ciel date du II^e siècle de notre ère. Il s'agit du planisphère de Gêrúvigus conservé au British muséum et qui reproduit les étoiles et figures mythiques décrites par les arabes. Tout le Moyen-âge vécut de l'héritage astronomique

de Ptolémée et des catalogues célestes de l'astronome perse Al-Sufi (964) et Ulugh Begh (1437). En 1536, Pierre Apimes dessine la première carte en forme de planisphère.

1.2. Désigner les étoiles : l'apparition de la nomenclature

Dans l'ancienne astronomie et jusqu'à Galilée ou Kepler, on désignait les étoiles par leur position sur la figure mythique de la constellation. C'est Alessandro Piccolomini, évêque de Patras, qui propose dans un livre "Les étoiles fixes" d'indiquer les étoiles de chaque constellation par des lettres de l'alphabet latin.

Et l'allemand Johannes Bayer (1572-1625), dans son atlas gravé *Uranometria* (1603) qui contenait 51 cartes, proposa d'appeler les étoiles par les lettres grecques, en fonction à la fois de l'ordre d'éclat décroissant et de leur alignement selon les figures mythiques. L'atlas décrivait 60 constellations et rassemblait 1706 étoiles, dont les premières reconnaissances du ciel austral dues aux navigateurs hollandais (le catalogue précédent de Tycho Brahé ne contenait que 1005 étoiles).

Une réforme chrétienne de la cartographie mythologique de Bayer, tentée par Schiller en 1627, n'eut pas de suite.

Deux siècles plus tard (fin du XVIII^e siècle), dans la nouvelle édition du catalogue de John Flamsteed (1725), premier directeur de l'observatoire de Greenwich, les étoiles sont indiquées par des numéros. Pour la première fois, des étoiles visibles uniquement au télescope sont portées sur des cartes. Rappelons auparavant, le catalogue de Halley (1712). Les deux systèmes (lettres grecques et numéros) sont aujourd'hui utilisés.

Entre-temps, William (version anglicisée de Wilhelm) Herschel (1738-1822), organiste et hautboïste d'origine allemande, astronome amateur, démontre que la voie lactée est faite d'étoiles. Il découvre aussi les étoiles doubles (en fait les binaires liées) et qu'on pouvait en déterminer les masses relatives. Les progrès de l'astronomie firent grande impression, comme en témoigne l'exclamation à l'époque de William Huggin, riche anglais, qui annonça en 1863 que la Terre et les cieux ne faisaient qu'un.

Parmi les catalogues récents, citons le *Bonner Durchmusterung* (Catalogue de Bonn) d'Argelander, publié de 1859 à 1862. Réalisé à Bonn par l'*Astronomische Gesellschaft* (A.G.) avec un télescope de 72 mm, il comprend la position et la magnitude usuelle de toutes les étoiles plus brillantes que la magnitude 9,5 situées au-dessus de la déclinaison 22°, soit 459 000 étoiles, indiquées par le signe BD suivi de la déclinaison et du numéro de la zone du ciel correspondante.

Ce catalogue "AGK₁" fut complété par un catalogue similaire du ciel austral ("AGK₂") compilé en Argentine, à Cordoba. Le *Cordoba Durchmusterung* comprend 580 000 étoiles jusqu'à la magnitude 10, notées CBD. Une troisième extension de ces catalogues fut réalisée à l'observatoire du Cap (Afrique du Sud). Mentionnons encore le fameux catalogue d'Henry Draper (1918-1924) ou catalogue de Harvard, dont il sera fait mention plus loin en détail à propos de la spectroscopie.

Le catalogue d'étoiles le plus récent est celui de l'observatoire astronomique du *Smithsonian Astrophysical Observatory* qui donne les mouvements de 259 000 étoiles. Leur nom est précédé du sigle SAO suivi d'un nombre.

Dans le cas des étoiles doubles, la distance peut être appréciée directement : la relation masse-luminosité permet d'apprécier la masse de chacune des deux composantes. La connaissance de la période de révolution permet ensuite, en utilisant les lois de Képler, de déterminer le demi-grand axe de chaque orbite (les deux étoiles tournent autour du centre de gravité commun au système). Connaissant enfin la distance angulaire des composantes du couple, on calcule leur éloignement à la Terre.

5.3. Parallaxe photométrique

Pour certaines étoiles variables (céphéides par exemple), il existe une relation entre la luminosité absolue et la période de variation (*relation période-luminosité*). On dispose ainsi d'une mesure directe de la magnitude absolue. La comparaison avec la magnitude apparente permet de calculer la distance de telles étoiles. Cette méthode a été employée notamment pour mesurer la distance de certaines galaxies proches.

Il existe également pour certaines novae une relation entre la magnitude absolue et le moment du maximum, qui peut être utilisée, comme précédemment, pour calculer la distance par comparaison avec la magnitude apparente.

5.4. Parallaxe spectroscopique

Enfin, on peut utiliser directement la relation entre le type spectral (la classe de luminosité) et la magnitude absolue à partir du diagramme HR pour trouver la distance à partir de la comparaison avec l'éclat apparent.

5.5. Étude de la taille des étoiles

La mesure des distances, couplée à celle du diamètre angulaire, va permettre de déterminer le diamètre réel des étoiles. Plusieurs méthodes existent :

- * la méthode interférométrique permettant une mesure directe du diamètre angulaire a été proposée par Fizeau et mise en oeuvre par Michelson et Pease au Mont Wilson en 1920. Cette méthode est difficile, limitée par l'atmosphère, et n'a permis de faire des mesures que sur une dizaine d'étoiles parmi les plus grosses.

- * l'occultation par la Lune .

- * l'observation des variables à éclipse (qui a permis notamment de déterminer le diamètre de la composante d'Algol).

5.6. Détermination des masses

Seules les étoiles doubles (en fait, seuls les couples physiques), permettent une mesure directe des masses. Celles-ci sont encore accessibles de manière indirecte en utilisant la relation masse-luminosité (diagramme HR), mais la méthode ne s'applique qu'aux étoiles de la séquence principale.

Hormis les investigations qui s'organisèrent progressivement autour de l'émergence de l'astrophysique, il est des domaines institués lesquels, tout en ayant pris leur essor à ce propos, n'en mènent pas moins une existence propre. Tels peuvent se présenter l'étude des étoiles doubles et variables, dont la riche matière ne sera qu'évoquée ici.

Les
étoiles
portent
une
lettre ou
un
numéro

La
gros-
seur
des
étoiles

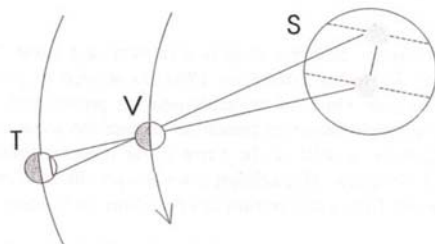


Fig. 12. Mesure de l'Unité Astronomique (distance Terre-Soleil) par mesure du déplacement apparent de Vénus sur le disque solaire lorsqu'on l'observe à partir de deux points éloignés sur Terre

La détermination de l'UA étant d'autant plus précise que l'on choisit une planète proche, la détermination faite plus tard grâce à la petite planète Eros fut encore meilleure. Les premières mesures de parallaxes trigonométriques ont ainsi été faites dans le système solaire.

La première mesure de parallaxe d'étoile fut effectuée entre 1837 et 1840 par Friedrich Bessel (1784-1846). Ce fut celle de 61 Cygni. Bessel avait opéré à l'aide d'un télescope doté d'un dispositif pour mesurer les angles très petits. La parallaxe de 61 Cygni qu'il avait mesurée était en effet de $0,3''$ d'arc (exactement $0,314'' \pm 0,02''$), ce qui n'est pas très éloigné de la valeur actuelle de $0,292''$, ce qui met l'étoile à 680 000 UA, soit 10,7 années-lumière. En 1841, John Hershell (1792-1871), le fils de William, remettait à Bessel la médaille de la Royal Astronomical Society de Londres.

Thomas Henderson (1798-1844), à l'observatoire du Cap, mesura la distance de l'étoile α Centauri et trouva une parallaxe de $1''$, soit une distance de 3 AL (la valeur exacte est de $0,745''$, soit 4,38 AL).

L'allemand Friedrich Struve (1793-1864), à l'observatoire de Dorpat (cela ne s'invente pas !) en Russie (aujourd'hui Tartou), mesura la parallaxe de Véga à l'aide d'une lunette de 24 cm de diamètre munie d'un objectif construit par Fraunhofer. Il trouva la valeur de $0,125'' \pm 0,01''$ (la valeur actuelle est de $0,123''$), soit une distance de 25 AL. Un demi-siècle plus tard, les parallaxes d'une trentaine d'étoiles distantes de moins de 70 années-lumière étaient déterminées.

Au XX^e siècle, on eut recours à la méthode photographique, plus précise et d'un meilleur rendement. En effet, la mesure des parallaxes stellaires nécessite des instruments de longue focale, peu lumineux. Il faut savoir que sur une photographie prise à l'aide d'un instrument de 10 m de focale, $1''$ d'arc représente un intervalle de 0,05 mm (50 mm) sur le papier ; une parallaxe de $0,05''$ (20 parsecs, soit environ 70 AL) représente un intervalle de 0,002 mm (2 mm !) sur la photographie.

Avec un instrument de 2 m de focale seulement, il faudrait être capable de d'apprécier des intervalles de 0,4 mm. Aujourd'hui on connaît les parallaxes trigonométriques de près de 10 000 étoiles situées à des distances allant jusqu'à 400 AL. Au-delà, la méthode devient inapplicable.

5.2. Parallaxe dynamique

Aujourd'hui, ces catalogues servent avant tout de référence ; en revanche, la cartographie du ciel a fait des progrès prodigieux dans le domaine de l'accessibilité et de la convivialité grâce à l'informatique et aux logiciels de cartographie.

Les constellations ne sont plus aujourd'hui des figures mythiques, mais des zones du ciel, dont les limites définies par Argelander pour le ciel boréal et Gould pour le ciel austral furent fixées par une commission, dont les travaux furent approuvés à l'assemblée générale de l'Union Astronomique Internationale (UAI) à Leyde en 1928 (document officiel publié en 1930). 88 constellations furent répertoriées, dont 48 "classiques" et 40 nouvelles du ciel austral.

2. La naissance de l'astrophysique

Cependant, les progrès de l'astronomie, plus que ceux de toute autre science, furent liés à l'évolution des instruments d'observation. C'est particulièrement vrai pour l'observation des étoiles qui, passé la première époque de cartographie du ciel, va apporter sa contribution essentielle à la connaissance scientifique.

Il est intéressant de constater que ce sont les étoiles, qui sont parmi les objets astronomiques les plus inaccessibles, en tous cas moins que les planètes, qui permettront d'accéder aux mystères de la substance cosmique et apporter la meilleure contribution à notre connaissance fondamentale de la matière. Cette investigation s'est faite par des voies détournées car c'est l'analyse de la lumière qui fournira les clés pour pénétrer dans les secrets des corps les plus lointains de l'univers.

2.1. L'éclat des étoiles

C'est Ptolémée, au II^e siècle après JC qui a établi dans l'Almageste la première distinction des étoiles en "classes" ou "grandeurs". Les étoiles de "première grandeur" sont ainsi celles qui apparaissent les premières dans le ciel, peu après le coucher du Soleil. Puis viennent les étoiles de deuxième, troisième, etc. jusqu'à la sixième grandeur.

On lui doit aussi le terme de *magnitude*. Il s'agit bien sûr de l'éclat apparent, mais au temps de Ptolémée, où l'on croyait que les étoiles se situaient sur une sphère fixe, on pensait qu'il s'agissait de leur éclat réel. En réalité, on sait que l'éclat apparent des étoiles décroît avec le carré de leur distance (comme l'éclat d'un projecteur qui, pour une distance double, s'étale sur une aire quatre fois plus importante (fig. 2).

Les
premières
classes
d'étoiles

C'est l'américain Pogson (1809-1891) qui proposa de mesurer l'éclat apparent des étoiles selon une échelle logarithmique :

l'augmentation d'une unité de magnitude dans l'échelle de Ptolémée correspond ainsi à une diminution d'éclat de 2,5 fois environ. Plus précisément, une étoile de magnitude 5 est 100 fois moins lumineuse qu'une étoile de magnitude 0. Ce qui signifie qu'une différence d'une unité de magnitude correspond à une différence d'éclat de $100^{1/5}$ » 2,512, ce qui conduit à une échelle logarithmique de base $a \approx 2,5$. Le rapport d'éclat entre deux étoiles E_1 et E_2 de magnitude respectivement m_1 et m_2 est ainsi égal à $E_2 / E_1 \approx a^{(m_1 - m_2)}$.

Cette proposition s'appuyait sur le principe émis par le physicien allemand Gustav Fechner (1801-1887) : quand l'intensité de la stimulation visuelle croît en progression géométrique, la sensation physiologique croît en progression arithmétique. L'étoile polaire, à laquelle on attribua la magnitude 2,12 fut choisie comme référence (mais comme on découvrira par la suite qu'elle est variable, elle ne servit que pour la convention initiale).

Pour déterminer la magnitude absolue, on corrige la magnitude apparente en considérant toutes les étoiles comme situées à une distance de 10 parsecs soit 32,6 années-lumière.

Rappelons que le parsec (condensation du terme "parallaxe-seconde") est la distance à laquelle le demi-grand axe de l'orbite terrestre (la distance Terre-Soleil lorsque la Terre est au plus loin de celui-ci) serait vu sous un angle de 1 seconde d'arc (fig. 3). Le parsec vaut ainsi 3,26 années-lumière. Les télescopes modernes permettent de voir jusqu'à la magnitude 23-24.

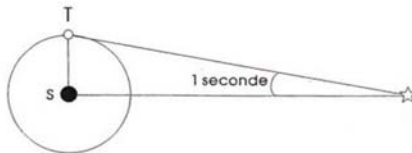


Fig. 3. Définition du Parsec (voir texte)

2.2. La photométrie stellaire

Jusqu'à la première moitié du XX^e siècle, on ne dispose que de magnitudes visuelles (on utilise des "photomètres visuels"). Par la suite, viendra la photographie. Le rapport d'éclat pour des étoiles de couleur différente n'étant pas identique, la

L'indice de couleur

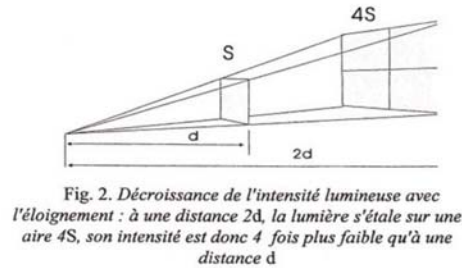


Fig. 2. Décroissance de l'intensité lumineuse avec l'éloignement : à une distance $2d$, la lumière s'étale sur une aire $4S$, son intensité est donc 4 fois plus faible qu'à une distance d

Les distances

En 1971 le satellite *UHURU* détectait dans la direction de Cygnus X-1 situé à 6500 AL, découvert à l'aide de fusées-sondes en 1962, la source la plus importante de rayons X observée à ce jour. On était probablement en présence d'une super géante bleue, dont l'éclat variait rapidement en raison de sa rotation autour d'un compagnon invisible de taille inférieure à celle de la Terre et de masse supérieure à la masse critique d'une étoile à neutrons. Il s'agissait sans aucun doute d'un trou noir et le rayonnement X est due au disque d'accrétion des gaz issus de la super géante.

D'autres candidats trous noirs ont été depuis décelés : A0620-00 dans la constellation de la Licorne (monoceros) et située à 3000 AL, LMC X-3 dans le grand nuage de Magellan. Les thèses concernant la structure des trous noirs demeurent cependant suspendues à la validité de la théorie de la relativité.

5. Autres études stellaires

5.1. Parallaxes trigonométriques

La méthode des parallaxes trigonométriques consiste à calculer l'éloignement d'une étoile en mesurant son déplacement apparent sur le fond du ciel, par rapport à des étoiles éloignées qui servent de référence, lorsque la Terre se déplace (comme les arbres proches semblent se déplacer sur le fond du paysage lorsqu'on se déplace en voiture).

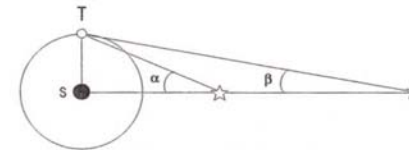


Fig. 11. Parallaxe des étoiles

On se sert du demi-grand axe de l'orbite terrestre comme base de la mesure des parallaxes (fig. 11), d'où l'intérêt de disposer d'une mesure précise de l'Unité Astronomique (ou UA). Ce fut même l'une des préoccupations majeures des astronomes au XVIII^e siècle. Cette mesure fut effectuée notamment en observant le passage de la planète Vénus devant le disque solaire (fig. 12). Les circonstances favorables sont relativement rares.

La première observation eut lieu en 1639 ; puis d'autre suivirent : en 1761, 1769, 1874, 1882. On se souvient de la mésaventure de Guillaume le Gentil de la Galaisière, parti aux Indes pour observer le passage de 1761, obligé de rebrousser chemin en raison de la guerre franco-anglaise qui y éclata, décidant d'attendre le passage de 1769, le manque et revint en France où on le croyait mort, tant et si bien que ses biens étaient dispersés entre les héritiers ! Il n'en reste pas moins que ces passages permirent d'estimer la distance Terre-Soleil à 151,5 millions de km.

quatre, ils formèrent une groupe dynamique surnommé "B₂FH" qui co-signa un article intitulé : "Synthèse des éléments lourds dans les étoiles" (synthèse jusqu'à l'uranium). Ils affinèrent ainsi le modèle d'évolution stellaire dans sa phase géante rouge et établirent la structure "en pelure d'oignon" pour les étoiles en fin d'évolution.

4.5. Confirmation du modèle de vie stellaire

SN 1987 A fut suivie par différents détecteurs placés sur des instruments disposés dans des ballons ou satellites (*International Ultraviolet Explorer* ou *Solar Maximum Mission*). "IUE" capta les émissions d'un nuage de matière de faible densité éjecté par l'étoile quelque 20 000 ans auparavant (au cours de sa phase de géante rouge).

En décembre 1987, près d'un an après l'explosion, "Solar Max" capta dans la direction de l'ex-supernovae des rayons g prévus par la théorie de B₂FH. Au moment même de l'explosion, des bouffées de neutrinos avaient été détectés, 18 heures avant que la supernovae ne soit découverte. Malheureusement, alors qu'on s'attendait à trouver au centre du résidu de la supernovae un *pulsar*, l'observation ne fut pas confirmée.

4.6. L'aventure des pulsars

En 1937, George Gamow étudia à fond le processus de neutronisation. Robert Oppenheimer et George Volkoff calculèrent la limite théorique de la masse d'une étoile à neutrons comme se situant entre 0,1 et 0,7 masse solaire. C'est Jocelyne Bell qui, en effectuant une thèse sur le vent solaire, décrivit en 1967 des signaux radio réguliers en provenance de différentes régions du ciel. C'est ainsi que les premiers signaux produits par des pulsars furent mentionnés en appendice de sa thèse.

Son professeur, Hewish, reçut le prix Nobel pour avoir émis le premier modèle de mécanisme de pulsar (basé sur la "palpitation" de l'étoile). Ce dernier fut battu en brèche par la théorie de Thomas Gold (1968), celle d'une étoile à neutrons en rotation rapide par conservation du moment cinétique. En 1968, on découvrit un pulsar au centre de la nébuleuse du crabe.

En 1969, on observa un pulsar émettant dans le visible. Depuis 1969, plus de 400 pulsars furent découverts, et jusqu'en 1974 où fut observé un pulsar dans la constellation de l'aigle.

4.7. Quasars et trous noirs

L'univers des années 1960 regorge de forces violentes. On découvrit d'autres objets presque ponctuels, d'abord comme radiosources très puissantes, puis observées dans le visible, qu'on a appelés *quasars* (pour "Quasi Stellar radiosources"), lesquels sont interprétés comme des zones d'accrétion de matière en singularité situées au centre de certaines galaxies.

John A. Wheeler appela "trou noir" ce qu'on avait jusque-là désigné sous le nom de "collapsar" ou "étoile gelée". Le chef de file de cette école était Stephen Hawking, partisan de la relativité générale et de l'idée de la formation de mini-trous noirs peu après le Big Bang.

différence entre la magnitude photographique, obtenue en utilisant des plaques sensibles à différentes couleurs, et la magnitude visuelle, fournit une indication objective sur la couleur, nommée *indice de couleur*.

L'ensemble des techniques utilisées pour mesurer un flux lumineux est appelé *photométrie* (on distingue ainsi la photométrie visuelle de la photométrie photographique ou photoélectrique). Pour les intensités faibles, on utilise des tubes photomultiplicateurs. Par un jeu de filtres, on peut aussi sélectionner les radiations U (dans l'ultraviolet), B (bleues) et V (vert-jaune), analyse qui fut à la base d'un système de classification des étoiles nommé UBV. On distingue aussi les étoiles R (rouge) et I (infrarouge), rayonnement qui donne accès aux étoiles naissantes.

Les mesures de magnitudes visuelles et photographiques sur des étoiles-étalon furent effectuées entre 1900 et 1920 à Harvard par deux pionniers de la photométrie astronomique : Edward C. Pickering (1846-1919) et Henrietta Leavitt (1868-1921).

La photométrie mesure en fait un spectre d'émission continu, dans un domaine de fréquence assez large (l'éclat de l'étoile est intégré sur tout le spectre). Mais c'est la *spectroscopie* qui allait conduire en fait à l'élucidation des secrets de la matière stellaire.

3. L'aventure de la spectroscopie

En 1666 Newton, à la suite de Descartes, admit que la lumière blanche est constituée d'un mélange de toutes les couleurs. Il effectua sa fameuse expérience de la décomposition de la lumière par le prisme (fig. 4), et reconstitua la lumière blanche en reconcentrant par une lentille la lumière ainsi

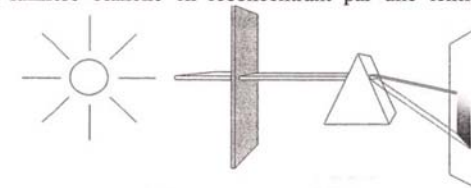


Fig. 4. Décomposition de la lumière par le prisme

décomposée (fig. 5).

Il invente le terme de "spectre", du latin *spectrum* (apparition). Ce qui n'empêcha pas Johann Wolfgang von Goethe de considérer en 1790, soit plus d'un siècle plus tard, cette hypothèse comme absurde.

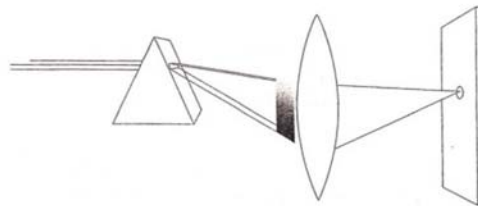


Fig. 5. La lumière blanche, mélange de toutes les couleurs du spectre

Pendant longtemps, cette découverte ne fut pas utilisée par les astronomes, qui ne s'intéressaient pas à la nature des étoiles, tentant tout au plus de les cartographier et les considérant comme un objet mineur. Seul les passionnait le système solaire et les mouvements des planètes.

3.1. La lumière striée

En 1814, Fraunhofer, onzième enfant d'un modeste maître vitrier, avait entrepris l'observation du spectre du Soleil. Il y dénombre 600 raies sombres (aujourd'hui, on en connaît plus de 20 000). Excellent opticien, il fabriqua un réseau produisant des spectres plus détaillés que ceux des prismes et mit en évidence également les raies d'émission.

Dès le début, Fraunhofer eut l'idée d'adapter la spectroscopie à l'étude des étoiles. Avant lui, William Wollaston avait bien observé dès 1802 des lignes sombres dans les spectres, mais avait cru à de simples discontinuités dans l'émission des couleurs.

Ce n'est qu'en 1859 que Gustav Robert Kirchhof (1824-1887) - qui avait trouvé que les impulsions électriques se propageaient à la vitesse de la lumière - et Robert Wilhelm Bunsen (1811-1899) mettaient au point un procédé d'identification de corps chimiques à partir des couleurs qu'ils émettent en brûlant, véritable "signature spectrale" des corps chimiques (fig. 6).

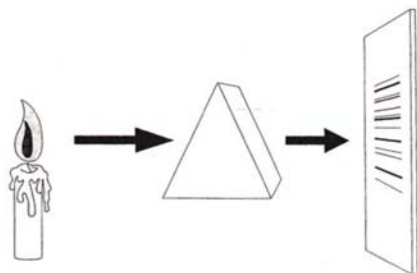


Fig. 6. Un gaz incandescent ou une substance excitée émet un spectre de raies correspondant à des longueurs d'onde précises

La
super-
novae
de 1987
...

... et
celle de
1993

proximité de notre galaxie. Depuis l'observation par Kepler d'une explosion d'étoile dans notre galaxie en 1604, personne n'avait eu une telle chance, si l'on exclut l'"étoile invitée" observée en 1054 par les chinois à l'emplacement de l'actuelle nébuleuse du crabe, et celle observée en mai de l'an 1006, qui fut visible même en plein jour et se montra capable de donner une ombre aux objets la nuit

Quelques années plus tard, le 28 mars 1993, un astronome amateur espagnol, Francisco Garcia, découvrit une supernovae dans la galaxie M81, 60 fois plus éloignée que le grand nuage de Magellan, et baptisée SN 1993 J. Cette supernovae n'apparaissait pas encore sur le cliché pris le 27 mars à 22 h T.U. par un autre amateur, français cette fois-ci, Jean-Claude Merlin, alors qu'elle est présente sur une autre image prise 9 heures plus tard par un amateur américain, Bill Neely.

SN 1993 J provient d'une supergéante jaune et correspond aux supernovae de type II (effondrement d'étoiles massives après photo désintégration du fer), par opposition aux supernovae de type I (effondrement, suivi d'explosion nucléaire, de naines blanches ayant dépassé, par accréation de la matière d'étoiles proches, la limite de Chandrasékhara).

4.4. Petite incursion vers le Big Bang

C'est à partir de 1914 sous la conduite de Vesto Slipher, puis à partir de 1924 à l'aide du nouveau télescope du Mont Wilson confié à Edwin Hubble, que de multiples observations mettront en évidence l'immensité d'un univers peuplé de myriades de galaxies comme la nôtre. C'est là aussi que l'idée d'un univers en expansion va germer. En effet, Hubble découvrit le décalage vers le rouge des raies spectrales et établit jusqu'en 1929, à l'aide de son assistant Humason, ancien conducteur de mûles, que ce décalage est d'autant plus important que les galaxies sont éloignées.

Le modèle statique d'univers d'Einstein était contesté dès 1917 par l'astronome flamand De Sitter. En 1922 puis 1924, Alexandre Friedmann, météorologiste russe passionné de physique conteste les calculs d'Einstein et plaide pour un univers dynamique. Un modèle d'univers en expansion et issu d'une explosion originelle est développé en 1927 par un mathématicien belge élève d'Eddington, l'abbé Georges Lemaître, et baptisé *Hypothèse de l'atome primitif*, titre de son ouvrage.

Eddington, réexamina les hypothèses de son ancien élève Georges Lemaître et opta lui aussi, dès 1930, pour un univers expansionniste. En 1932, il publie son fameux ouvrage *L'Univers en expansion*. Et c'est par dérision pour une vision qu'il jugeait ridicule que Fred Hoyle, dans une émission radiophonique se moqua de l'hypothèse de l'atome primitif et des expansionnistes en parlant d'une théorie du "Big Bang" (le gros boum). On connaît la fortune de l'expression.

En 1948, Serge Gamow, l'un des partisans les plus farouches de la théorie du Big Bang, avança l'idée que l'hydrogène et l'hélium étaient produits lors d'une explosion initiale. Hoyle, quant à lui, partisan de l'état stationnaire de l'univers, proposa l'idée de la création continue de matière. Il était donc à la recherche d'un mécanisme assurant la synthèse des éléments plus lourds.

Le jeune William Fowler s'attacha à la théorie de Hoyle. Tous deux entreprirent une étude afin de rendre compte de la composition des étoiles telle qu'on la détermine à l'aide de leurs spectres, bientôt rejoints par Margaret et Geoffroy Burbidge ; à eux

En 1926, Ralph Howard Fowler (prix Nobel 1983) montra par la mécanique quantique qu'un tel astre cesserait de s'effondrer grâce à la *pression de dégénérescence* due au *Principe d'Exclusion* découvert par Wolfgang Pauli en 1925, empêchant deux électrons d'occuper le même état quantique. Une telle pression, contrairement à celle d'un gaz, est indépendante de la température et permet aux naines blanches, bien que "froides", de ne pas s'effondrer par gravité.

Peu après, William Anderson montra que pour des densités très élevées, la vitesse des électrons approche celle de la lumière (électrons dits *relativistes*). En 1930, l'astronome Subrahmanyan Chandrasékhara (né en 1910 au Pakistan) compléta par la relativité les calculs de Fowler en montrant que de telles particules exercent moins de pression que les particules lentes. Il aboutit ainsi à une théorie complète des naines blanches, donnant comme limite supérieure pour une naine blanche la masse de 1,44 masse solaire.

On estime aujourd'hui que les étoiles de moins de 8 masses solaires à leur naissance évoluent en naine blanche (les étoiles de plus de 1,44 masse solaire perdent une partie de leur matière au cours de leur vie). En revanche, pour les étoiles de masses supérieures, personne ne savait ce qu'elles devenaient sur le diagramme HR.

4.3. À l'autre extrémité, les supernovae

C'est dans les années 50 que l'évolution des étoiles fut abordée de manière très complète par Martin Schwarzschild (le fils du célèbre Karl) qui fut le premier à utiliser l'ordinateur (dès 1948) pour établir les équations d'un modèle mathématique d'évolution stellaire, tandis que Hoyle "planchait" sur l'aspect conceptuel. Cette modélisation mathématique leur permit de prévoir l'évolution en géante rouge et de mettre en évidence une frontière située à 2,5 masses solaires, en-deçà de laquelle les "petites" étoiles devaient passer par une série de conflagrations. La difficulté était de disposer d'un mécanisme qui transformerait l'effondrement en explosion.

C'est Fritz Zwicky, un bulgare élevé en Suisse, qui défendit l'idée d'étoiles qui explosent. Cette explosion affecte des étoiles qui ont entre 10 et 100 masses solaires. Dans une même galaxie, une telle explosion devrait être observée environ 1 ou 2 fois par siècle. Déjà, en 1931, lors d'un congrès sur les novae, Zwicky baptisa "supernovae" la catégorie des novae plus brillantes que les autres et supposa que les phénomènes de novae et de supernovae avaient des origines différentes, distinction qu'il posa dans un article publié en 1933. Il eut la chance d'avoir accès au télescope à grand champ du mont Wilson à l'aide duquel il parcourut le ciel.

En mars 1937, Zwicky décèle sa première supernovae dans la galaxie NGC 4157, et une deuxième le 26 août. Au cours des trois années suivantes, il découvre 12 supernovae. À lui seul, Zwicky en recensa 120. Au total, en comptant celles que Zwicky avait lui-même découvertes, 281 supernovae furent ainsi répertoriées entre 1937 et 1975 (un an avant sa mort). Aujourd'hui, les astronomes du monde entier ont recensé quelque 600 explosions d'étoiles. On n'en détecte pas moins d'une trentaine chaque année, dans d'autres galaxies.

Enfin, le 24 février 1987, à l'observatoire de Las Campanas au Chili, à trois heures du matin heure locale, Ian Shelton fixe sur la pellicule une explosion d'étoile dans le grand nuage de Magellan. *SN 1987A* fut ainsi la première supernovae observée à

Kirchhof confirma l'intuition de Fraunhofer sur l'origine des raies d'absorption : "atmosphères" plus "froides" entourant les étoiles et dont les éléments absorbent la lumière dans les longueurs d'onde dans lesquelles ils émettent lorsqu'ils sont excités (fig. 7).

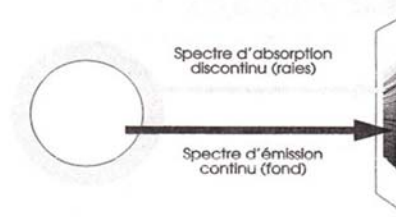


Fig. 7. Origine des raies d'absorption observées sur le spectre des étoiles. Les gaz absorbent dans les longueurs d'onde dans lesquelles ils émettent lorsqu'ils sont excités

Il déchiffra le spectre solaire et y identifia l'hydrogène, le sodium, le fer, le calcium, le magnésium, le nickel et le chrome. Quelques années plus tard, des astronomes observant le Soleil pendant une éclipse y décelèrent les raies spectrales d'un élément inconnu sur Terre, qu'ils baptisèrent Hélium, du grec *hlios* (*hélios*), qui signifie le Soleil).

Par la suite, d'autres comme William Huggins (1824-1910), Joseph Lockyer (1836-1920) ou Jules Janssen (1824-1907) posèrent les fondations de ce nouveau type d'étude. Deux ans après la découverte de Kirchhof, Jules Janssen identifiait dans le spectre de Bételgeuse la présence de la double raie du sodium. Lamont, puis Gianbattista Donati (1826-1873), vers 1860, contribuèrent à mettre la spectroscopie en honneur. Donati publie en 1862 le spectre d'une quinzaine d'étoiles. Cette époque témoigne aussi du lien naissant entre l'astronomie et la physique, jetant les bases de ce qui constituera plus tard l'*astrophysique*.

3.2. L'évolution du système de classes d'étoiles

La spectroscopie allait se révéler un outil précieux et décisif pour l'étude des étoiles. Elle présente deux intérêts majeurs : 1) d'abord un intérêt *qualitatif* (les spectres d'émission permettent de connaître la composition des étoiles, les spectres d'absorption la composition de leur atmosphère, éléments, ou molécules pour les étoiles "froides"), 2) ensuite un intérêt *quantitatif* (abondance des ions, atomes ou molécules, conditions physiques dans lesquelles ils se trouvent, notamment la température, champ magnétique, vitesse radiale de la source, etc.)

Le père Angelo Secchi (1818-1878), jésuite et physicien, directeur à partir de 1849 du Sacré-collège du Vatican lequel possédait un observatoire, comprit l'importance de l'analyse spectrale. Dès 1863 et pendant cinq ans, il examina à l'aide d'un télescope de 24 cm les spectres de près de 4000 étoiles.

Il définit quatre types d'étoiles selon leur couleur, la position, largeur, nombre et intensité (ou opacité, le cas échéant) des raies spectrales (fig. 8). Secchi mit en

L'essor
de la
spectro-
scopie

évidence un point essentiel, à savoir que le nombre, la position et l'intensité des raies (c'est-à-dire le *type spectral* - une sorte de "code barre" de l'astre) dépendent de la couleur de l'étoile.



Fig. 8. Spectre d'émission et d'absorption d'une étoile

3.3. William, Henry et Anna Draper

L'appari-
-tion du
spectro-
graphe

La photographie ne tarda pas à prendre le relais de l'observation visuelle. L'américain John William Draper, médecin, astronome et photographe avait, en 1843, réalisé l'une des premières photographies du spectre solaire.

Il laissa à son fils, Henry Draper (qui allait passer à la postérité grâce au catalogue de Harvard toujours utilisé aujourd'hui) son observatoire de Hastings-on-Hudson (NY). Henry photographia en 1872 le spectre de Véga et obtint, grâce à un système qu'il baptisa *spectrographe* (un spectroscope muni d'un appareil photo) les spectres de 80 autres étoiles. Il mourut 10 ans plus tard.

En 1886 sa veuve, Anna Draper, créa avec les 400 000 \$ qu'il lui avait légués la fondation Henry Draper destinée à financer l'observatoire de Harvard pour un ambitieux programme de spectrographie stellaire et de classement. Le directeur de l'observatoire, Edward C. Pickering, se mit en quête de fonds complémentaires et recruta un contingent de femmes pour dépouiller les innombrables plaques photographiques qui n'allaient pas tarder à s'entasser.

3.4. L'observatoire de Harvard entre en scène

Afin d'obtenir un nombre important de spectres nécessaire à la classification entreprise, le spectrographe à fente disposé au foyer et qui ne permet de photographier qu'un spectre à la fois, fut remplacé par un *prisme-objectif* à l'aide duquel on obtenait l'image du spectre de centaines d'étoiles sur la même plaque photographique. Cependant, ce système ne peut être utilisé qu'avec des lentilles de taille modeste ; on ne peut donc prendre en considération que les étoiles les plus brillantes du champ considéré.

Williamina Flemming, première assistante de Pickering, entreprit dès 1886, conjointement avec ce dernier, le projet de classement de l'observatoire. La classification adoptée améliorait et étendait le classement de Secchi basé uniquement sur les similitudes spectrales. Les 13 classes proposées par Flemming étaient basées sur le taux d'hydrogène décroissant. En 1890, le catalogue comprenait déjà 10 351 étoiles de l'hémisphère Nord.

En 1888, Pickering confie à Antonia Maury l'analyse plus complète des 681 étoiles les plus brillantes de l'hémisphère Nord. Celle-ci abandonna le système de classement de Mrs Flemming et développa un schéma de 22 groupes basé sur l'intensité relative des raies - larges ou étroites, floues ou nettes - et désignés par des chiffres romains, avec des sous-groupes *a*, *b* et *c*. En désaccord avec Pickering, elle quitta Harvard en

Les
étoiles,
boules
d'hydro-
gène et
d'hélium

l'effondrement de l'étoile sous le poids des couches superficielles est compensée par la pression interne, calorifique, du gaz. Dès 1882, Sir Arthur Stanley Eddington, professeur d'astronomie à l'Université de Cambridge, propose un modèle d'équilibre radiatif des étoiles.

4. Vers la cosmologie

L'accumulation de telles connaissances descriptives était presque prématuré, et attendait en fait le bouleversement qu'amènèrent la mécanique quantique et de la relativité.

4.1. La composition des étoiles et le modèle de fusion nucléaire

En 1923, Eddington critique le modèle de Russell en calculant que dans le cœur des étoiles, la température devait atteindre une dizaine de millions de degrés et que, dans de telles conditions, la pression de radiation qui avait été négligée jusqu'alors, devait à elle seule s'élever à 25 millions d'atmosphères. Ainsi, pour une étoile de masse égale à 100 fois celle du Soleil, la pression de radiation suffirait à la faire exploser.

Par ailleurs, le modèle d'atome du néo-zélandais Ernest Rutherford (1911) laissait présager que dans le cœur des étoiles, les lois des gaz parfaits continuaient à s'appliquer, ne permettant plus de cautionner le modèle de Russell avec la contraction gravitationnelle comme source d'énergie. Aux yeux d'Eddington, l'explication résidait dans la fusion exoénergétique des noyaux d'hydrogène en hélium, seule capable de rendre compte de la générosité du rayonnement stellaire en raison de la transformation de matière en énergie selon la célèbre relation $DE = Dmc^2$.

L'anglaise Cecilia Payne, brillante étudiante de Harvard, vint au secours de cette hypothèse en démontrant, à partir des spectres, que toutes les étoiles brillantes étaient composées d'une énorme masse d'hydrogène, suffisante pour alimenter pendant longtemps des réactions thermonucléaires, et d'une petite quantité d'hélium, ces deux éléments représentant en outre 98 % de la masse cosmique. En 1926, Eddington publia "La structure interne des étoiles".

Dès lors, le modèle thermonucléaire se précisa. Hans Bethe (prix Nobel 1967) décrivit le cycle proton-proton qui porte son nom. Par ailleurs, par la découverte de l'*effet tunnel*, le physicien russe Gamow démontra qu'il n'est pas nécessaire d'atteindre les 10^{10} K dans le cœur de étoiles pour déclencher la fusion nucléaire par agitation thermique.

4.2. L'évolution en naine blanche

L'évolution des étoiles en naine blanche, une fois qu'elles avaient épuisé leur "carburant" fut pressentie dès les années 1930. C'est l'allemand Friedrich Bessel qui avait constaté, dès 1844 des irrégularités dans le mouvement de Sirius. Au cours des trente années suivantes, les astronomes attribuèrent cette irrégularité à un compagnon très petit et très dense, Sirius B, et avaient émis l'hypothèse qu'il pouvait s'agir d'une naine blanche. Mais la théorie fut vivement combattue par Eddington.

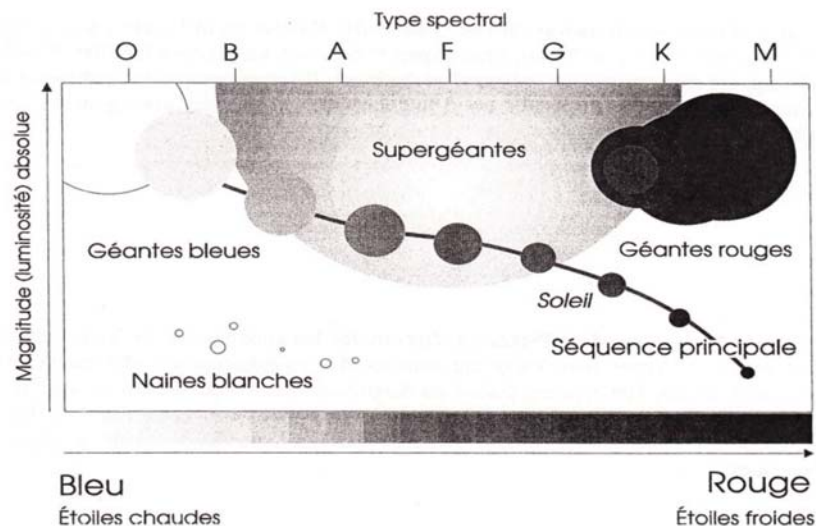


Fig. 10. Schématisation moderne du diagramme de Hertzsprung-Russell

3.8. Du Diagramme HR à l'astrophysique

Jusque-là, la plupart des astronomes avaient supposé que l'évolution stellaire suivait la séquence spectrale : au début de sa vie, une étoile serait ainsi chaude et blanc-bleu pour devenir froide et rouge à la fin. Russell appuya l'idée que les deux types d'étoiles rouges de Hertzsprung (géantes et naines) représentaient respectivement le premier et le dernier stade du cycle de vie d'une étoile.

Toute étoile était ainsi d'abord géante rouge, puis se contracte et s'échauffe, atteignant la séquence principale d'abord par le "haut" (étoiles bleues de classe O), puis continue à se contracter, parcourant la séquence principale tandis qu'elle épuise son énergie, jusqu'à ce qu'elle redevienne une naine de classe M.

Russell croyait ainsi que toutes les étoiles suivaient le même cheminement et que le diagramme les représentait à différents stades de leur évolution. Bien qu'il envisageait dès 1913 la possibilité d'un rayonnement secondaire par radioactivité, partant de son diagramme, il pensait que le rayonnement de l'étoile était principalement dû à l'énergie gravitationnelle produisant de la chaleur.

Helmholtz et le physicien anglais Lord Kelvin avaient émis la même hypothèse dans les années 1850-1860. D'après ce schéma, les premières estimations donnaient une durée de vie de 17 millions d'années pour le Soleil (des estimations ultérieures indiquent 50 millions d'années).

En 1882, Lord Kelvin s'intéresse à l'équilibre hydrostatique des étoiles. En 1869 Lane puis plus tard Emden proposent comme modèle d'étoile une sphère gazeuse en équilibre hydrostatique, dans laquelle la pression de gravitation tendant à

1896. Entre-temps, elle avait réussi à isoler certains types d'étoiles, notamment le groupe des supergéantes.

Anny Jump Cannon (1863-1941) fut désignée pour s'attaquer au classement des 1100 étoiles les plus brillantes de l'hémisphère Sud. Elle réaménagea la séquence alphabétique utilisée par Fleming afin d'y introduire davantage de "progressivité", en se basant sur d'autres éléments que l'hydrogène.

Le résultat fut une distribution des étoiles par couleur, des blanc-bleu aux rouges en passant par les jaunes. Elle combina aussi certains groupes, et en omit d'autres. Elle définit ainsi les fameuses classes O B A F G K M (que l'on retient par la phrase mnémotechnique : "Oh, Be A Fine Girl, Kiss Me") où l'ordre alphabétique initial a été "bousculé".

Chacune des classes fut elle-même divisée en sous-classes ou *types*, identifiées par un chiffre allant de 0 à 9, associé à la lettre désignant la classe : ainsi, le type G₂ (la catégorie du Soleil) désigne une étoile de la classe G que l'on peut classer, d'après ses caractéristiques, à une "distance" de G égale à deux dixièmes de la "distance" G-K.

3.5. Spectre et magnitude

Bien que la classification de Harvard fut basée initialement sur une étude empirique des spectres, il apparut qu'elle pouvait aussi constituer une échelle des températures stellaires. En effet, les études spectrales en laboratoire avaient montré que la couleur des objets chauds dépendait de leur température superficielle, et ces couleurs suivaient l'ordre du spectre. La loi de Wien stipule en effet que l'augmentation de température entraîne un déplacement vers les faibles longueurs d'onde du maximum de densité de l'énergie rayonnée (fig. 9). Ainsi, les étoiles étant lumineuses à la manière des corps incandescents, les plus chaudes dégagent la plus grande partie de leur énergie dans le blanc-bleu, correspondant aux courtes longueurs d'onde, les étoiles "froides", plutôt dans le rouge.

Entre-temps, Joseph Stefan (1835-1893) avait établi sa loi selon laquelle la quantité d'énergie rayonnée par des corps assimilables à des corps noirs croît proportionnellement à la puissance quatrième de la température absolue. On disposait donc d'un moyen de connaître la température superficielle des étoiles. Une telle mesure directe est appelée *température effective*.

En théorie, il suffit de mesurer le maximum de densité spectrale pour déterminer la température. En pratique, si elle est aisée pour quelques étoiles très proches et très grosses, et bien sûr pour le Soleil (5800°), pour les étoiles faibles, cette mesure est difficile, mais compte tenu de l'allure différente, pour des étoiles de couleur différente, des courbes représentant la densité spectrale en fonction de la longueur d'onde, on se base sur le rapport d'intensité de la lumière émise dans deux longueurs d'onde différentes.

Cette mesure indirecte indique ce qu'on appelle la *température de couleur* (à ne pas confondre, bien qu'elle s'en rapproche, avec l'indice de couleur défini plus haut). Les étoiles du type O sont des étoiles "chaudes", à 30 000 K, celles du type M, des étoiles "froides" à 3000 K. Les sept classes se rapportaient ainsi à l'ordre décroissant des températures.

Spectre
et
température
des
étoiles

La
température
de
couleur

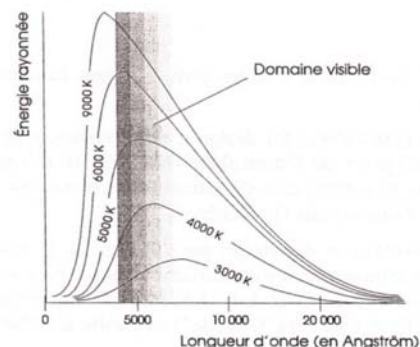


Fig. 9. Lorsque la température croît, le maximum d'énergie rayonnée se déplace vers les courtes longueurs d'onde

3.6. Le catalogue de Harvard (suite)

Le 4 octobre 1911, Anny Cannon entreprit l'étude des spectres de 250 000 étoiles. Celle-ci fut achevée le 30 septembre 1915 (!). Le schéma d'Anny Cannon est connu désormais sous le nom de "Classement Henry Draper" ou *Fundamental Henry Draper Catalogue of Stellar spectra* publié en 9 volumes à partir de 1918, alors qu'il contenait les spectres de 225 000 étoiles jusqu'à la 10^e magnitude (marquées du sigle HD suivi d'un numéro), complété par la suite par les spectres de 13 000 autres étoiles.

En 1925, paraissait un volume complémentaire sous le nom de *Henry Draper Extension* prenant en compte 47 000 étoiles supplémentaires jusqu'à la 11^e magnitude (signalées par le sigle HDE suivi de leur numéro d'ordre). Le fameux catalogue Henry Draper comporte ainsi en tout très exactement 275 305 étoiles avec leur type spectral. Ce n'est pourtant qu'en 1938, à 75 ans, qu'Anny Cannon fut nommée Professeur d'astronomie à Harvard.

En 1943, trois astronomes américains, William Morgan, Philip Keenan et Edith Kellman intégrèrent les subdivisions de classes d'étoiles d'Antonia Maury dans une version révisée du classement de Draper. Leur système fut connu sous le nom de "Système MKK".

Des classes complémentaires furent définies pour des étoiles particulières : W (étoiles de Wolf-Rayet), C (étoiles carbonées, anciennement catégories R et N), P, Q, S. D'autres classifications furent proposées par la suite, plus précises, notamment la classification de l'*Institut d'Astrophysique de Paris* (IAP) de Chalonge et Barbier, utilisant la position et l'intensité de la discontinuité de Balmer de l'hydrogène. Notons que des représentations en trois dimensions conviendraient mieux dans certains cas.

L'éclat des étoiles dépend de leur couleur et du type spectral

Il vérifia cette corrélation sur l'amas lâche des Hyades (dont les étoiles sont à peu près équidistantes de la Terre), dans lequel il décéla deux grandes familles d'étoiles, qu'il appela respectivement "géantes" et "naines". Il remarqua que le premier de ces groupes, qui constituait une exception flagrante dans la relation, correspondait à une subdivision spectrale pressentie par Antonia Maury.

En 1908, il demanda à Pickering d'incorporer les subdivisions de Maury dans le classement de Draper, mais Pickering resta sourd à ses exhortations. Mettant en forme ses observations, Hertzsprung établit un diagramme dans lequel il mit en abscisse la couleur des étoiles, dans l'ordre du spectre, et en ordonnée la magnitude absolue, et constata que la plupart des étoiles occupaient une bande étroite qu'il baptisa *Séquence principale*.

Hertzsprung publia le résultat de ses observations dès 1905 dans un journal consacré aux problèmes scientifiques liés à la photographie, malheureusement peu lu par les astronomes.

Indépendamment, l'américain Henry Norris Russell (1877-1957) évalua la magnitude absolue de quelques étoiles et découvrit la même relation qu'Hertzsprung, dont il apprit la découverte par le physicien allemand Schwarzschild, et auquel il écrivit aussitôt. Notons que Hertzsprung et Russell ne purent établir leur fameuse relation que sur quelques centaines d'étoiles en tout, dont l'éloignement avait été déterminé.

Russell présenta ses résultats en 1913, dans lesquels il mettait en abscisse non pas simplement la couleur, mais les types spectraux, en utilisant la classification de Harvard (O B A, etc.), afin de tenir compte à la fois de la couleur et de la température des étoiles. 90 % d'entre elles "tombaient" ainsi dans la séquence principale.

En présentant ce diagramme, Russell précisa que le travail d'Hertzsprung avait précédé le sien, de sorte que ce fameux graphique a toujours été connu sous le nom de *Diagramme d'Hertzsprung-Russell*, ou *Diagramme "HR"* (fig. 10)