

ASTROPHYSIQUE

Étoiles, Univers et relativité

Jean Heyvaerts

Professeur émérite de Physique et d'Astrophysique
à l'université de Strasbourg

DUNOD

Illustration de couverture :

La nébuleuse du Crabe est ce qui reste de l'explosion, observée en 1054, d'une supernova dans la constellation du Taureau.

Elle abrite en son centre une étoile à neutrons formée lors de l'explosion.

© NASA, ESA, J. Hester, A. Loll (ASU)

© Dunod, 2012, 2021 pour la nouvelle présentation
11, Rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
EAN : 97821008279926

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

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

Avant-propos

Ce livre a pour origine un cours proposé en option aux étudiants de Maîtrise, puis de première année de Master de sciences physiques de l'université de Strasbourg. Cet enseignement se propose à la fois de présenter quelques domaines de l'astrophysique actuelle, autour du thème de l'évolution des étoiles et de l'Univers, et de montrer que ces phénomènes grandioses constituent une symphonie jouée par un orchestre dont chaque discipline de la physique est un musicien. Ce livre souhaite faire admirer cette œuvre magnifique et surprenante qu'est l'évolution du cosmos, tout en faisant mieux connaître ses interprètes.

Chaque aspect de la physique qui pourrait être nouveau pour le lecteur fait l'objet d'une présentation concise, mais néanmoins précise, dont le point de départ ne requiert pas d'autres connaissances que celles que peut posséder un étudiant de licence de cette discipline : quelques notions de base de mécanique classique, de thermodynamique et de mécanique quantique. Les concepts nouveaux sont aussitôt mis en œuvre dans le contexte astrophysique ayant conduit à les présenter. En ce sens, ce livre est aussi un livre de physique qui invite à parcourir, et permet d'apprendre, des sujets divers parmi lesquels : la mécanique statistique d'équilibre thermodynamique ou hors d'équilibre, la relativité restreinte et générale, divers aspects de la physique des particules élémentaires.

Chaque chapitre propose en conclusion un problème ayant pour objet d'étendre le propos développé dans les pages qui le précèdent. La recherche de la solution placera le lecteur intéressé dans une démarche de découverte active et constituera un moyen plaisant et utile de consolider les connaissances nouvellement acquises. Les réponses et les quelques pistes indiquées lui permettront de surmonter les obstacles qui pourraient se présenter.

Je remercie mes collègues de l'université de Strasbourg de m'avoir donné l'occasion de présenter ce cours. L'intérêt qu'il a suscité auprès de nos étudiants, leur plaisir à consolider et enrichir leur connaissance de la physique au spectacle de sa mise en œuvre dans l'évolution de l'Univers ont été pour moi une source de grande satisfaction. Qu'ils trouvent tous ici l'expression de ma reconnaissance et de ma sympathie.

Je dois à Pierre Hemmerlé d'avoir fait naître chez moi le souhait de rassembler mes nombreuses notes polycopiées en une présentation plus cohérente qui puisse être plus largement proposée : un livre. Je lui en suis très reconnaissant. Qu'il soit vivement remercié aussi pour l'aide importante apportée tout au long de la préparation de cet ouvrage et pour avoir grandement contribué à ce qu'il se présente finalement dans une forme littéraire digne de la langue française. Son soutien amical et chaleureux et celui de son épouse m'ont été précieux. Maxime Viallet a aimablement accepté d'intervenir pour la réalisation de quelques figures. Je l'en remercie vivement.

Introduction

L'astrophysique a pour objectif de comprendre la physique de l'origine, de la structure et de l'évolution des astres et même celle de l'Univers dans son ensemble (la cosmologie).

L'ambition de cet ouvrage est de donner une vision globale des principaux objets astrophysiques – les étoiles, les galaxies, l'Univers – et d'établir la synthèse entre leur nature d'une part, leur description et interprétation physiques d'autre part. Il apparaîtra chemin faisant que des aspects différents de la physique y interviennent simultanément. Cette complémentarité est l'un des attraits que peut présenter l'astrophysique pour qui étudie la physique.

Notre connaissance de l'Univers s'appuie sur des observations qui doivent être comprises et interprétées. Aujourd'hui tout le spectre électromagnétique est observable, des ondes radio hectométriques aux rayons gamma d'énergie supérieure à 100 TeV. L'observation spatiale a permis de surmonter les difficultés causées par l'opacité atmosphérique à certaines longueurs d'onde.

Nous assistons maintenant au développement d'une astronomie non photonique, qui détecte des messagers qui ne sont pas des photons. Depuis les années 1980 s'est développée une astronomie des neutrinos. Les flux de neutrinos solaires ont été observés, tout comme ceux de la supernova SN1987A, qui a explosé dans le grand nuage de Magellan. Depuis le milieu de la première décennie de ce siècle, l'observatoire Pierre Auger, situé en Argentine, détecte des particules cosmiques dont l'énergie dépasse 10^{19} électrons-volts ! Leur étude permettra d'identifier les plus puissants accélérateurs de particules de notre univers proche. Des instruments destinés à la détection des ondes gravitationnelles, les interféromètres Ligo et Virgo, ont été mis en service à la même époque, aux États-Unis et en Italie respectivement. Les ondes gravitationnelles, dont l'existence est prévue par la théorie de la relativité générale, n'ont encore jamais été directement détectées. Elles témoignent des changements brutaux d'une gravitation très forte. Leur observation nous renseignera sur le déroulement de phénomènes très exotiques comme la fusion de deux étoiles à neutrons ou de deux trous noirs, qui ne dure que quelques millisecondes.

Nous nous sommes limités dans ce livre, d'une part à l'étude de la physique des étoiles, des causes de leur évolution et de leur aboutissement à des formes d'astres ultracompacts, et d'autre part à l'étude de l'Univers à des stades précoces de son développement. La physique et l'exploration des astres du système solaire, la formation des étoiles, la structure et l'évolution des galaxies ainsi que les questions relatives à l'activité des astres ultracompacts ont été laissées de côté. L'espace limité de l'ouvrage, mais aussi la volonté de concentrer l'étude sur des aspects très généraux de l'astrophysique sont les raisons de ce choix.

Table des matières

AVANT-PROPOS	V
INTRODUCTION	VI
VALEURS NUMÉRIQUES UTILES	X
CHAPITRE 1 • LES ÉTOILES	1
1 Une grande variété	1
2 Distances des étoiles	1
3 Masses des étoiles	2
4 La lumière des étoiles	3
5 Le diagnostic des régions profondes	8
6 Diagramme de Hertzsprung et Russell	8
CHAPITRE 2 • ÉTOILES EN ÉQUILIBRE	17
1 Les équilibres d'une étoile	17
2 Les équations d'équilibre	18
3 Équations du champ gravitationnel	20
4 Équilibre sphérique autogravitant	21
5 Microphysique et structure stellaire	24
CHAPITRE 3 • LE TRANSPORT DE L'ÉNERGIE DANS LES ÉTOILES	27
1 Le transfert radiatif	27
2 Équation de transfert du rayonnement	28
3 Le transport photonique de la chaleur	37
4 La convection	40
CHAPITRE 4 • ÉTATS DE LA MATIÈRE DANS LES CONDITIONS ASTROPHYSIQUES	47
1 Importance de l'équation d'état	47
2 Systèmes quantiques de particules identiques	47
3 Le postulat d'entropie statistique maximum	54
4 Équilibres de particules non interagissantes	61
5 Équation d'état de gaz parfaits	66
6 Équilibres de réactions chimiques	68
7 Considérations sur l'état de la matière	74
8 Les états de la matière astrophysique	77
CHAPITRE 5 • TERMES ULTIMES DE L'ÉVOLUTION STELLAIRE	83
1 Relation entre densité et pression centrales	83
2 Sorts ultimes à l'issue de l'évolution	86
3 Masses critiques et constantes fondamentales de la physique	88
4 L'évolution thermique des astres	90

CHAPITRE 6 • LA NUCLÉOSYNTÈSE STELLAIRE	95
1 Taux des réactions nucléaires	95
2 La combustion de l'hydrogène	104
3 La combustion de l'hélium	107
4 Stades ultérieurs d'évolution	113
5 Le phénomène de supernova	114
6 La nucléosynthèse stellaire	118
CHAPITRE 7 • RELATIVITÉ RESTREINTE	125
1 Caractère relatif de la simultanéité	125
2 Espace-temps et quadrigéométrie	127
3 Variétés riemanniennes	130
4 Vecteurs sur une variété de Riemann	134
5 Tenseurs	138
6 Objets quadrigéométriques physiques	141
CHAPITRE 8 • RELATIVITÉ GÉNÉRALE	151
1 Critique de la notion de référentiel d'inertie	151
2 Vers une théorie relativiste de la chute libre	153
3 Théorie relativiste de la gravitation	156
4 La physique en présence de gravitation	158
5 Géodésiques	159
6 Transport parallèle de vecteurs et tenseurs	163
7 Tenseur de Riemann-Christoffel	169
8 L'équation d'Einstein	174
9 Ondes gravitationnelles	179
CHAPITRE 9 • ASTRES RELATIVISTES ET TROUS NOIRS	185
1 Gravitation stationnaire et sphérique	185
2 Écriture de l'équation tensorielle d'Einstein	188
3 La gravitation de Schwarzschild	193
4 La gravitation de Kerr	195
5 Orbites dans un champ de Schwarzschild	196
6 Gravitation de Schwarzschild et photons	202
7 Structure des astres relativistes froids	210
CHAPITRE 10 • THÉORIE RELATIVISTE DE L'EXPANSION DE L'UNIVERS	215
1 L'Univers, objet physique autogravitant	215
2 La métrique de Robertson-Walker	216
3 Dynamique globale de l'Univers	222
4 L'expansion de l'Univers	228

CHAPITRE 11 • FAITS D'OBSERVATION CONCERNANT LA COSMOLOGIE	237
1 L'Univers extragalactique local	237
2 L'expansion de l'Univers	238
3 Décalage spectral et géométrie universelle	241
4 L'Univers prégalactique et ses traces fossiles	250
5 Le fond diffus de rayonnement cosmologique	251
6 Structures de l'Univers proche	258
7 Le milieu intergalactique	261
8 Des anomalies de gravité	262
9 Les théories MOND	273
10 Formations des galaxies	283
CHAPITRE 12 • UNIVERS CHAUD ET PREMIERS NOYAUX	289
1 Densités d'énergie dans l'Univers actuel	289
2 La notion de découplage	290
3 Entropie du milieu universel	294
4 Évolution balistique des particules	296
5 Expansion de l'Univers chaud	298
6 Le passé des photons	301
7 Le passé des leptons	304
8 Le passé des neutrinos	308
9 Histoire du rapport neutrons-protons	311
10 La nucléosynthèse primordiale	313
CHAPITRE 13 • CHAMPS DE JAUGE	323
1 Avant l'ère leptonique	323
2 Théorie lagrangienne des champs classiques	326
3 Champs de jauge	336
4 Le mécanisme de Higgs	346
CHAPITRE 14 • L'UNIVERS INFLATIONNAIRE	355
1 L'idée d'Univers en inflation	355
2 Fluctuations thermiques et potentiel effectif	359
3 Une transition de phase d'un vide à un autre	362
4 L'Univers inflationnaire	366
5 À propos de l'origine de la matière	375
6 Univers et Physique	376
BIBLIOGRAPHIE	379
INDEX	381

Valeurs numériques utiles

An	$1 \text{ an} = 3,15 \cdot 10^7 \text{ s}$
Constante de Boltzmann	$k_B = 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot ^\circ\text{K}^{-1}$
Constante de la gravitation	$G = 6,668 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
Constante de Planck	$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
Constante de Planck réduite	$\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
Constante de Stefan-Boltzmann	$\sigma_B = 5,669 \cdot 10^{-8} \text{ J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot ^\circ\text{K}^{-4}$
Charge du proton	$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Luminosité du Soleil	$L_\odot = 3,90 \cdot 10^{26} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1} \approx 4 \cdot 10^{26} \text{ J} \cdot \text{s}^{-1}$
Masse de l'électron	$m_e = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$
Masse du proton	$m_p = 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Masse du Soleil	$M_\odot = 1,989 \cdot 10^{30} \text{ kg} \approx 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
Parsec	$1 \text{ pc} = 3,085 \cdot 10^{16} \text{ m}$
Rayon du Soleil	$R_\odot = 6,959 \cdot 10^8 \text{ m} \approx 700\,000 \text{ km}$
Unité Astronomique	$1 \text{ UA} = 1,496 \cdot 10^{11} \text{ m} \approx 150 \cdot 10^6 \text{ km}$
Vitesse de la lumière	$c = 299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Chapitre 1

Les étoiles

1.1 UNE GRANDE VARIÉTÉ

Le Soleil est une étoile, beaucoup plus proche de nous que les autres. Ce fait, pressenti par Descartes, n'a pu être démontré que lorsqu'au milieu du XIX^e siècle, la distance de certaines étoiles a pu être mesurée et que l'on a pu se rendre compte que le Soleil placé à cette distance nous apparaîtrait avec un éclat comparable à celui de ces étoiles. Nous pouvons distinguer des détails à la surface du Soleil, mais les étoiles sont généralement vues comme des points lumineux. Ce que nous savons d'elles repose sur l'analyse du rayonnement que nous en recevons, que nous pouvons étudier par photométrie ou spectrométrie.

Toutes les étoiles ne se ressemblent pas. Elles diffèrent tant par leur luminosité que par leur couleur. Certaines sont simples et d'autres sont doubles (en orbite l'une autour de l'autre). La plupart ont une luminosité et une structure constantes dans le temps, mais certaines sont variables, parfois fortement, sur des échelles de temps qui peuvent se situer entre le jour et des dizaines d'années.

1.2 DISTANCES DES ÉTOILES

La distance des étoiles les plus proches peut être déterminée en mesurant un effet de parallaxe prenant pour base le diamètre de l'orbite terrestre. La direction où l'observateur situe l'étoile dans l'espace varie un peu avec sa position sur l'orbite terrestre, c'est-à-dire selon la période de l'année. Cet effet est indécélable pour les astres les plus lointains et reste très faible pour ceux qui le sont moins. Il cause pour

les étoiles les plus proches une faible variation (d'une fraction de seconde d'arc et de périodicité annuelle) de leur direction apparente par rapport à celle des astres beaucoup plus lointains.

Ces derniers cependant ne restent pas fixes sur la carte du ciel en raison de l'aberration de la lumière. Il s'agit d'un changement apparent, de période annuelle, de la direction d'où semble provenir la lumière d'une étoile. Il résulte de la composition de la vitesse de l'observatoire avec celle des photons reçus de l'astre observé. L'aberration peut être retranchée des mesures et le mouvement parallactique, s'il n'est pas trop petit, peut alors être mesuré. Les étoiles les plus proches ont un angle de parallaxe de l'ordre d'une seconde d'arc. Une unité de distance, le « parsec », a été définie : un parsec (pc) est la distance à laquelle le rayon de l'orbite terrestre est vu sous une seconde d'arc :

$$1 \text{ parsec} \equiv 1 \text{ pc} = 3,09 \cdot 10^{16} \text{ cm}$$

L'étoile la plus proche de nous, Proxima Centauri, est à une distance de 1,3 parsec, soit 4 années-lumière. Pour mesurer la distance d'étoiles trop lointaines pour que l'effet de parallaxe soit décelable, il faut recourir à des méthodes indirectes qui ne seront pas toutes décrites ici.

1.3 MASSES DES ÉTOILES

Pour mesurer la masse d'une étoile, il faut observer un effet de la gravitation dont elle est la source, par exemple le mouvement orbital relatif des deux composantes d'une étoile double. La loi de Kepler précise en effet que le demi grand-axe a de l'orbite de l'une des étoiles par rapport à l'autre, sa période P (ou la pulsation orbitale Ω) et les masses m_1 et m_2 de chacune des deux étoiles du couple sont liés par la relation suivante, G étant la constante de gravitation :

$$\Omega^2 a^3 = G (m_1 + m_2) \quad (1.1)$$

Cette relation s'établit facilement dans le cas particulier d'une orbite circulaire à partir des équations du mouvement de chacune des étoiles par rapport au centre de masse du système. Celui-ci peut être identifié car c'est le seul point qui divise le segment joignant les deux étoiles dans un rapport fixe (m_2/m_1) et qui soit animé d'un mouvement rectiligne uniforme. La mesure de la pulsation orbitale Ω est aisée et celle de a est parfois possible, lorsque la distance du couple est connue. On en déduit $(m_1 + m_2)$, connaissant la constante de la gravitation G . Celle-ci doit être obtenue par des mesures de laboratoire.

1.4 LA LUMIÈRE DES ÉTOILES

1.4.1 Définitions photométriques

► Luminosité

La luminosité d'un astre est la quantité d'énergie qu'il rayonne par seconde. C'est une puissance. La luminosité totale, cumulant les rayonnements électromagnétiques de toutes fréquences, du domaine radio aux rayons gammas, est la « luminosité bolométrique ». Si nous faisons référence aux pertes radiatives subies par l'étoile dans une bande spectrale restreinte, appelons-la X , nous parlerons de « luminosité dans la bande X ». Nous pouvons définir une densité spectrale de luminosité par bande de longueur d'onde $L(\lambda)$ de telle manière que $L(\lambda)d\lambda$ soit la luminosité dans la bande de longueur d'onde infinitésimale $\lambda, \lambda + d\lambda$. De même pouvons-nous définir une densité spectrale de luminosité par bande de fréquence $L(\nu)$, telle que $L(\nu)d\nu$ soit la luminosité dans la bande de fréquence $\nu, \nu + d\nu$.

► Flux reçu

L'éclat apparent d'un astre dépend de sa luminosité mais aussi et surtout de sa distance à l'observateur. L'éclairement F , ou flux, produit par l'astre au niveau de l'observateur est la puissance reçue *par unité de surface* collectrice de lumière orientée perpendiculairement à la ligne de visée, hors atmosphère. L'éclairement est mesuré en Watts m^{-2} . Si l'émission est isotrope et qu'il n'y a pas d'absorption du rayonnement entre l'étoile et l'observateur, toute la luminosité L de l'astre passe à la distance D de façon uniforme à travers une sphère de surface $4\pi D^2$. Il en résulte que le flux produit par une étoile de luminosité L située à la distance D a pour valeur $F = L/(4\pi D^2)$. Il est possible, comme pour la luminosité, de définir des flux relatifs à diverses bandes spectrales ou des densités spectrales de flux.

► Magnitude

La magnitude m d'une étoile est une quantité sans dimension qui porte la même information que l'éclairement. Elle est à l'éclat des étoiles ce que les décibels sont au bruit sonore. La magnitude, souvent appelée magnitude apparente, qu'un observateur attribue à une étoile produisant un flux F est définie par :

$$m = -2,5 \log_{10}(F/F_o)$$

L'éclairement F_o est une valeur de référence choisie de façon *conventionnelle*. Notons l'analogie avec l'intensité acoustique I , exprimée en décibels, par définition égale à $I = 10 \log_{10}(W/W_o)$ où W est le flux d'énergie acoustique et W_o un flux d'énergie conventionnel de référence ($W_o = 10^{-12}$ Watts m^{-2}). Dans le cas d'une magnitude, l'éclairement de référence dépend de la bande spectrale dans laquelle la mesure est effectuée. Notons qu'une étoile ayant une plus petite magnitude qu'une autre est plus brillante.

► Magnitude absolue

La magnitude apparente m d'un astre dépend de sa distance. Sa magnitude absolue M est la magnitude qu'il aurait s'il était placé à une distance de 10 pc de l'observateur. Dans le vide le flux décroît avec la distance en $1/D^2$. Nous en déduisons que la différence entre la magnitude apparente (celle de l'astre à la distance où il se trouve réellement) et la magnitude absolue est de :

$$m - M = 5 \log_{10}(D(\text{pc})/10(\text{pc})) = 5 \log_{10}(D(\text{pc})) - 5$$

1.4.2 Couleur et spectre des étoiles

► Indices de couleur

La couleur d'un rayonnement est caractérisée de la façon la plus fine par la distribution de la lumière dans son spectre. Mais elle peut aussi être représentée de façon plus grossière, quoique toujours quantitative, par le rapport de l'éclairement reçu dans deux bandes de longueurs d'onde différentes. Précisément, l'indice de couleur entre deux bandes photométriques A et B est par définition :

$$C_{AB} = m_A - m_B$$

► Structure du spectre

Un spectre stellaire classique se compose d'un rayonnement continu auquel se superposent des raies qui sont, au moins dans le domaine des longueurs d'onde optiques, en absorption sur ce continu. Dans l'ultraviolet, les raies apparaissent parfois en émission. La figure 1.1 décrit schématiquement la distribution spectrale du rayonnement d'une étoile comme le Soleil.

Une étoile est un objet très opaque. Les photons ne peuvent s'en échapper librement qu'à partir d'une région très superficielle, sa « photosphère ». C'est pourquoi le Soleil, bien qu'il soit gazeux, paraît avoir une surface. Celle-ci est une zone de faible épaisseur (environ 1 000 km) comparée à son rayon (700 000 km). Schématiquement, le rayonnement émis a un spectre de corps noir dont la température est celle qui règne dans la photosphère. La couleur du rayonnement est en rapport avec la température de celle-ci ; « plus chaud » correspond à « plus bleu ». Une analyse plus fine doit tenir compte de ce que les photons de diverses longueurs d'onde n'ont pas tous la même section efficace d'absorption par la matière stellaire. Ceux pour lesquels le gaz stellaire est plus opaque s'échappent à partir d'altitudes plus élevées. Le gaz stellaire est plus opaque aux photons dont la longueur d'onde est celle d'une raie d'un élément relativement abondant qu'elle ne l'est à ceux du continu voisin et donc les photons de raie se dégagent de la photosphère à partir d'altitudes plus élevées que les photons du continu. Le gaz est aussi plus opaque aux photons de longueur d'onde plus courte qu'aux photons de longueur d'onde plus longue que les limites d'ionisation de Lyman ou de Balmer. Ces limites correspondent à des énergies de photons tout juste suffisantes pour ioniser l'hydrogène atomique à partir du

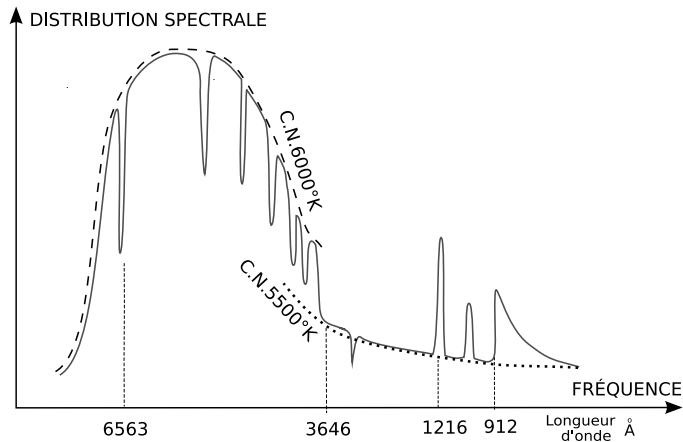


Figure 1.1 Aspect qualitatif général de la distribution spectrale du rayonnement d'une étoile semblable au Soleil.

L'échelle des fréquences diffère de part et d'autre de 3646 Å pour faciliter la lecture du graphique. La température du spectre de corps noir qui représente au mieux la distribution du continu diffère un peu au-delà et en-deçà de la limite de Balmer à 3 646 Ångströms. En tirets apparaît le meilleur ajustement de corps noir pour $\lambda > 3\,646$ Å, en pointillé le meilleur ajustement de corps noir pour la bande 912-3646 Å. Une discontinuité du continuum apparaît aussi à la limite de Lyman à 912 Å. Les raies sont en absorption dans le visible mais en émission en U.V. (voir texte).

fondamental (limite de Lyman à 912 Å, loin dans l'U.V.) ou du premier niveau atomique excité (limite de Balmer à 3 646 Å). En effet, les photons de longueur d'onde plus courte que la limite sont soumis à un processus d'interaction avec l'hydrogène, l'ionisation à partir du niveau considéré, processus auquel échappent ceux de longueur d'onde plus longue que la limite. C'est pourquoi les premiers se dégagent de la photosphère à partir d'altitudes plus élevées que les seconds.

Admettons – ce qui est vrai en première approximation – que l'intensité lumineuse émise à une longueur d'onde donnée soit celle d'un corps noir à la température de la région d'où ces photons s'échappent. À une longueur d'onde donnée, l'intensité du corps noir décroît avec sa température. Si celle-ci décroissait régulièrement avec l'altitude, l'intensité dans les raies, formées à plus haute altitude, serait plus petite que dans le continu voisin (raies en absorption) et l'intensité au-delà des limites d'ionisation serait plus faible qu'en-deçà. C'est bien ce qui est observé pour les raies optiques et la discontinuité de Balmer. Dans le cas du Soleil et de certaines autres étoiles, la discontinuité de Lyman est de signe inverse : l'intensité est plus faible aux fréquences inférieures à la limite de Lyman qu'aux fréquences supérieures. Ceci indique que dans ces étoiles-là, le gaz est plus chaud aux altitudes élevées d'où s'échappent les photons de fréquence supérieure à la limite de Lyman qu'aux altitudes d'où s'échappent ceux de fréquence inférieure à cette limite. La température dans l'atmosphère de l'étoile remonte avec l'altitude à partir d'un certain niveau ! Plus généralement, le contraste d'intensité aux limites d'ionisation et entre raies et continu voisin révèle la distribution de la température dans la photosphère.

1.4.3 Classification spectrale des étoiles

► Nature et intérêt d'une classification

Il est possible de classer les étoiles, dans une démarche de botaniste, en se basant uniquement sur des critères de présence ou d'absence dans leurs spectres de raies de différents éléments et de rapports d'intensité de ces raies. L'intérêt d'une telle classification est sa robustesse. La présence ou l'absence de telle ou telle raie dans un spectre stellaire est une propriété qui ne dépend presque pas des phénomènes affectant le rayonnement au cours de sa propagation entre l'étoile et nous-mêmes. En effet, contrairement à ce que par simplicité nous avons suggéré jusqu'à présent, l'espace intersidéral n'est pas vide. Il existe un « milieu interstellaire » qui est responsable d'une certaine absorption en route. Ce phénomène sert d'ailleurs de moyen d'étude de ce milieu (voir le problème du chapitre 3).

► Spectre de raies et température

Nous pourrions penser que la présence de raies de tel ou tel élément dans le spectre d'une étoile reflète la composition chimique de sa photosphère. Il n'en est rien, ou tout au moins pas dans une forme aussi naïve. Les raies d'un élément totalement absent de l'étoile n'apparaissent pas dans le spectre, mais celles d'un élément présent, voire abondant, peuvent rester invisibles à l'analyse spectrale si les conditions sont défavorables pour qu'il émette ou absorbe dans le domaine de longueurs d'onde observé. Ces conditions sont essentiellement sous le contrôle de la température. Que celle-ci soit trop élevée et l'élément n'existera pas dans l'atmosphère de l'étoile sous sa forme neutre – ou celle d'un ion ayant des raies dans le domaine optique – mais sous la forme d'un ion plus ionisé dont les raies se situent dans l'UV. Si l'élément est moléculaire, il se dissocie au-delà d'une certaine température à partir de laquelle il disparaît du spectre. Qu'au contraire la température soit trop faible, le niveau supérieur de la transition donnant lieu aux raies sera inaccessible ou le



Figure 1.2 Spectres d'étoiles, l'une chaude de type A1 (en haut) et l'autre plus froide, de type G0.

Les plus grandes longueurs d'onde sont à droite. Les raies de Balmer en absorption dominent le spectre de l'étoile de type A1. Elles sont bien moins visibles dans le spectre de l'étoile de type G0 où dominent les raies de métaux ionisés. Voir Jacoby et al. 1984 [11] ; figures présentées sur le site de l'Université d'Ohio : <http://www.astronomy.ohio-state.edu/~pogge/Ast162/Unit1/SpTypes/>

niveau inférieur trop peu peuplé. Si par exemple le niveau inférieur de la transition se situe par rapport au fondamental à une énergie supérieure à $k_B T$, la proportion d'atomes excités dans ce niveau est négligeable et les raies qui se forment en absorption à partir de ce niveau deviennent inobservables. Tel est le cas des raies de la série de Balmer de l'hydrogène, bien visibles dans le spectre des étoiles dont la photosphère est à une température de l'ordre de 10 000 °K car le niveau $n = 2$ est alors substantiellement peuplé, mais faibles dans le spectre des étoiles dont la température de surface est inférieure à 6 000 °K environ. Pourtant, l'hydrogène atomique est tout aussi abondant dans ces dernières étoiles que dans celles qui ont une plus grande température photosphérique. Le type spectral est donc avant tout un indicateur de la température qui règne dans la photosphère. Il ne renseigne que secondairement sur les abondances des éléments qui s'y trouvent. Seule une modélisation minutieuse de l'atmosphère d'une étoile et de la distribution spectrale du rayonnement qui en émane permet de déterminer les abondances des éléments dont il est possible d'observer les raies.

► Les éléments de la classification

Le type spectral est désigné par une lettre, sans signification particulière. Des types les « plus chauds » aux « plus froids », ces lettres se rangent dans l'ordre O B A F G K M. Chaque catégorie est partagée en 10 subdivisions notées de 0 à 9. Par exemple, le type A2 est plus proche du type B que du type suivant, F. Nous indiquons ci-dessous les propriétés qui servent de base à cette classification, en les mettant en rapport avec une valeur approximative de la température photosphérique. Une notation comme CaI désigne le calcium neutre, CaII le calcium une fois ionisé, etc. Le type spectral et la couleur d'une étoile reflètent tous deux la température photosphérique.

Type	T ° K	Critères spectraux
O	40 000	Raies d'éléments très ionisés : He II et Si IV
B	20 000	Raies de He I et raies de Balmer de H
A	10 000	Raies de Balmer fortes, faibles raies "H et K" de Ca II
F	7 000	Métaux ionisés : raies "H et K" de Ca II, Ti II, Fe II
G	5 500	Ca II et raies de métaux neutres (Fe I, Ca I, ...)
K	4 000	Ca II, métaux neutres, qqes molécules (CH, CN, TiO)
M	2 000	Bandes moléculaires. Bandes de TiO fortes

Figure 1.3 Les critères de la classification spectrale.

1.5 LE DIAGNOSTIC DES RÉGIONS PROFONDES

La grande opacité du Soleil interdisant l'observation de son intérieur profond par vision directe, sa structure interne, comme celle des étoiles, est restée longtemps un sujet d'études théoriques. Aujourd'hui il est possible de faire un diagnostic de la structure interne solaire par l'analyse du spectre en fréquence de ses oscillations acoustiques et par l'analyse de son émission neutrinique.

Une étoile étant un objet de dimensions finies, ses oscillations acoustiques sont semblables aux oscillations d'une cavité et se produisent avec des périodes discrètes qui, dans le cas du Soleil, sont voisines de 5 minutes. En surface, ces oscillations se traduisent par de faibles mouvements ou par de faibles fluctuations de température qui les rendent détectables. Le spectre de fréquence des oscillations acoustiques solaires est maintenant bien mesuré et de nombreuses fréquences propres sont connues avec précision. Ces oscillations affectant le Soleil dans son ensemble, leur spectre reflète indirectement la structure des régions internes dans lesquelles ces ondes se propagent. Cette information a permis de reconstituer avec précision la structure du Soleil presque jusqu'à son centre. L'observation des oscillations acoustiques globales de certaines étoiles est aussi possible et permettra bientôt de tester les modèles de leur structure interne.

Par ailleurs, les réactions nucléaires ayant lieu au centre du Soleil produisent des neutrinos qui s'en échappent directement. Malgré leur grande difficulté, des mesures de ce flux de neutrinos ont été réalisées. Elles nous renseignent sur le déroulement des réactions nucléaires internes à l'astre. Les flux de neutrinos observés sont inférieurs à ce que prévoit la théorie. Cela impose des contraintes aux modèles de structure interne du Soleil et a mis en question notre compréhension de la physique des neutrinos. Le physicien a été ainsi amené à suspecter que le neutrino électronique possède une masse, petite mais non nulle, et que les neutrinos subissent le phénomène « d'oscillation de saveur » qui les fait passer en cours de propagation alternativement de la saveur électronique à la saveur muonique ou tauique, celles-ci échappant à nos détecteurs. Ce phénomène est décrit dans le problème du chapitre 13. Il est établi aujourd'hui que la masse des neutrinos n'est pas nulle.

1.6 DIAGRAMME DE HERTZSPRUNG ET RUSSELL

1.6.1 Construction d'un diagramme HR

À chaque étoile proche dont la distance peut être mesurée, nous pouvons associer un point dans un diagramme Couleur sur Luminosité ou Type Spectral sur Luminosité ou bien, et c'est physiquement équivalent, Température Photosphérique sur Luminosité. La couleur, le type spectral et la température de la photosphère sont en effet des variables reliées entre elles. Dans ce diagramme, appelé diagramme de Hertzsprung-Russel ou diagramme HR, nous pouvons porter en ordonnée la luminosité ou tout aussi bien la magnitude absolue.

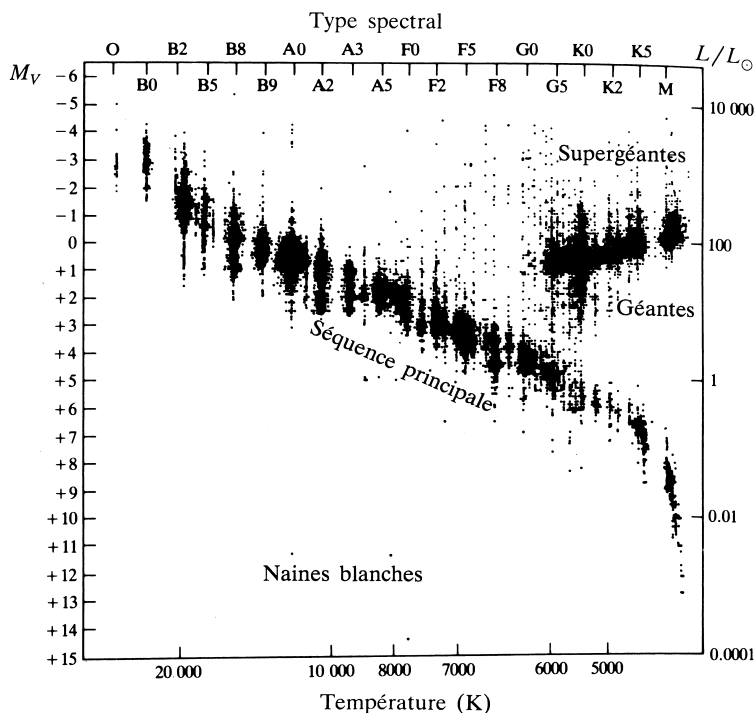


Figure 1.4 Diagramme de Hertzsprung-Russell des étoiles proches.

En ordonnée, au choix, la luminosité, en luminosités solaires (à droite) ou la magnitude absolue dans la bande V « visible » (à gauche). En abscisse, la température de corps noir du continu (en bas), du plus chaud à gauche vers le plus froid à droite. L'abscisse peut aussi être un indice de couleur (non représenté ici) ou bien le type spectral (en haut). L'échantillonnage par type spectral est responsable du rassemblement des étoiles en paquets. D'après Struve, 1950 [38].

De façon surprenante, les étoiles ne se distribuent pas n'importe comment dans ce plan (figures 1.4 et 1.5). La plupart d'entre elles se rassemblent dans une zone qui a la forme d'une *ligne* épaisse (épaisseur liée aux erreurs de mesure en plus d'une dispersion réelle). Cette ligne s'appelle la Séquence Principale, SP en abrégé. Il est aussi possible de reconnaître un groupe de géantes, bien plus lumineuses à couleur identique que les étoiles de la SP, quelques rares « super géantes » plus lumineuses encore, et enfin un groupe beaucoup moins lumineux à couleur égale que les étoiles de la SP, les « naines blanches ». Les naines blanches sont moins nombreuses dans ce diagramme car, très peu lumineuses, elles sont plus difficilement détectables. Ces faits indiquent que les étoiles qui se situent sur la Séquence Principale appartiennent à un ensemble « à un seul paramètre », dont la valeur les situe le long de cette séquence. Ce paramètre est la masse de l'étoile car nous verrons que c'est la masse qui contrôle la structure de l'astre. Un paramètre secondaire devrait permettre de situer les étoiles dans l'épaisseur de la séquence ; sa nature sera discutée plus loin.

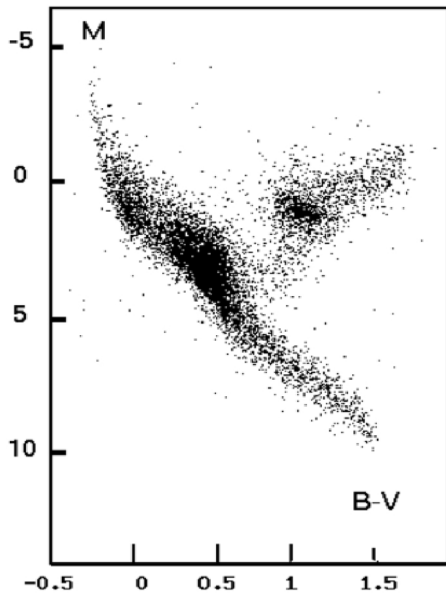


Figure 1.5 Diagramme de Hertzsprung-Russell des étoiles proches établi à partir de 11 125 étoiles dont la distance a été mesurée par le satellite HIPPARCOS.

En abscisse, l'indice de couleur (B-V) mesuré entre la bande bleue et la bande visible. En ordonnée, la magnitude absolue visible. L'aspect diffère de celui de la figure 1.4 car c'est la couleur et non la température qui est placée en abscisse. D'après Perryman *et al.*, 1995 [30].

1.6.2 Groupements d'étoiles : galaxies et amas

Les étoiles se groupent en galaxies dont il existe plusieurs types morphologiques, variant d'elliptiques à spirales. Notre galaxie, la Voie Lactée, regroupe environ 10^{11} étoiles. C'est une galaxie spirale.

Dans une galaxie donnée, les étoiles peuvent être des « étoiles du champ » (elles n'appartiennent à aucun sous-regroupement particulier) ou être membres de regroupements plus restreints, les amas d'étoiles, dont il existe deux types distincts. Les amas globulaires, liés par la gravitation, rassemblent entre 1 000 et 100 000 étoiles, voire plus, et se caractérisent par une forte densité d'étoiles. Les amas ouverts, non liés ou très peu liés, sont des groupes d'étoiles sans doute jeunes, « nées » ensemble, qui ne se sont pas encore dispersées mais le seront dans le futur, puisque ces amas ne sont pas gravitationnellement liés.

1.6.3 Diagramme HR des amas d'étoiles

Nous ne pouvons construire le diagramme HR absolu, portant en ordonnée la magnitude absolue, que dans la mesure où la distance des étoiles que nous y représentons est connue. Cependant, pour un amas, toutes les étoiles sont à peu près à la même distance D de nous. Leurs magnitudes apparente et absolue diffèrent d'une quantité commune à toutes les étoiles de l'amas. Il reste significatif de former pour l'amas un diagramme HR *relatif* où l'on porte le type spectral en abscisse et la magnitude apparente en ordonnée, car ce diagramme « relatif » se déduit du diagramme « absolu » par une translation parallèlement à l'axe des magnitudes de

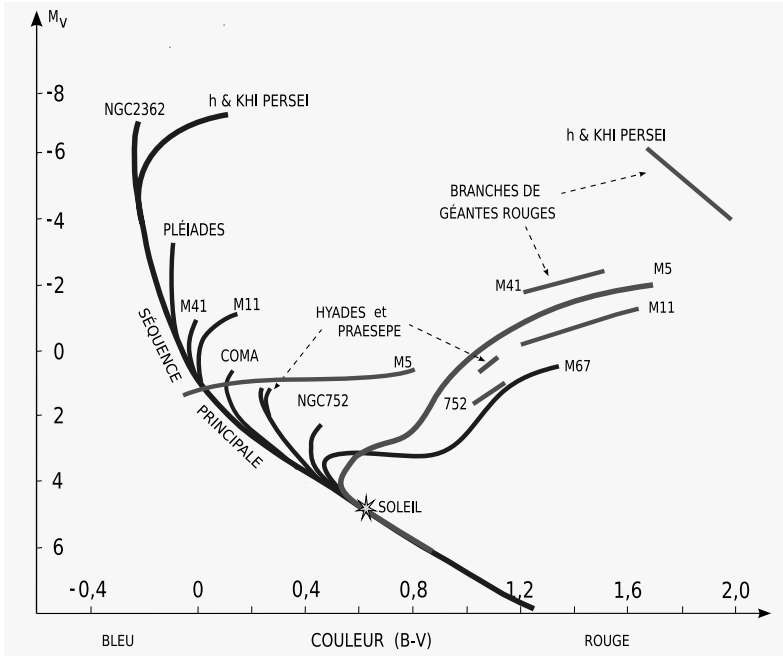


Figure 1.6 Superposition des diagrammes HR de différents amas d'étoiles.

Les étoiles rouges et peu lumineuses de la SP des amas ont été ramenées sur la SP du diagramme HR absolu. Les parties les plus lumineuses de la population stellaire des divers amas diffèrent, parfois considérablement. Le point où les étoiles de l'amas se séparent de la SP est un indicateur de l'âge de celui-ci. Adapté de Sandage, 1957 [35].

$\Delta m = 5 \log_{10} D(\text{pc}) - 5$. La forme des diagrammes reste la même dans les deux représentations. Si les diagrammes HR absolus de tous les amas étaient identiques, leurs diagrammes relatifs se déduiraient les uns des autres par de simples translations selon l'axe des magnitudes. Mais en réalité les formes des diagrammes HR d'amas différents sont diverses. Ils ne se déduisent pas les uns des autres par translation, *sauf* pour la partie la plus « rouge » et la moins lumineuse de la SP, partie qu'il est toujours possible de reconnaître et de superposer à la SP du diagramme HR absolu des étoiles proches par une translation verticale adéquate (figure 1.6). Cette translation peut être interprétée comme un effet de la distance de l'amas. Sa valeur permet de déterminer cette distance. L'explication la plus naturelle de ces observations est la suivante : il est vraisemblable que les étoiles d'un amas soient non seulement toutes groupées dans l'espace mais aussi qu'elles aient toutes à peu près le même âge. En effet, l'existence en tant qu'amas des systèmes ouverts ne peut qu'être brève puisqu'ils ne sont pas gravitationnellement liés, ce qui ne laisse que peu de temps à la formation stellaire pour agir. Quant aux amas globulaires, ce sont des systèmes liés bien plus réduits qu'une galaxie et qui ne peuvent retenir efficacement le gaz nécessaire à la formation de générations successives d'étoiles. Il ne s'y est en général pas déroulé de formation stellaire conséquente sur de longues échelles de temps après leur formation.