



SPECTROSCOPIE ET CLASSIFICATION SPECTRALE DES ETOILES

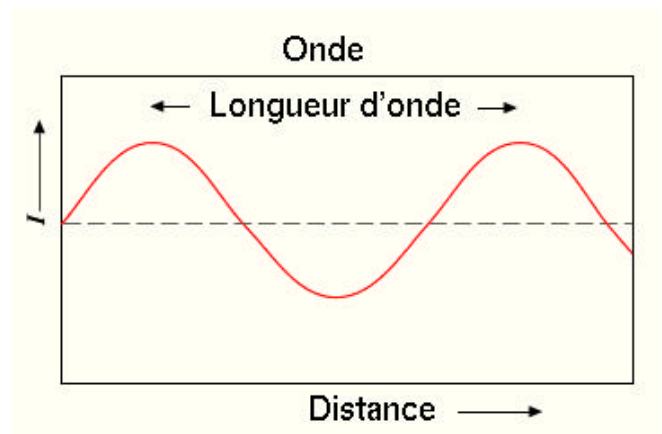
JP. Maratrey - Mars 2004

Un spectre est la représentation de la répartition d'une onde lumineuse en fonction de la fréquence (donc de l'énergie) de ses différents éléments.

Ce document se propose de donner une explication simplifiée du phénomène par l'étude de l'atome d'hydrogène, le plus simple des éléments. Il abordera ensuite les différents types de spectres rencontrés en astronomie. Enfin, il donnera une idée des renseignements qui peuvent être tirés d'un spectre ainsi que de la classification spectrale des étoiles.

Notions de base :

La lumière blanche visible est composée d'un mélange d'ondes dites électro-magnétiques. Chaque onde individuelle est caractérisée par sa longueur d'onde λ (lambda) et comprend deux composantes perpendiculaires, l'une électrique, l'autre magnétique.



La longueur d'onde λ est la distance parcourue par une onde avant de revenir dans la même position, avec le même sens de variation.

La fréquence d'une onde est le nombre de fois que la longueur d'onde est parcourue en une seconde. C'est le nombre de cycles par seconde. Elle est notée ν (nu) et est liée à la longueur d'onde par la relation :

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad \text{Où } c \text{ est la vitesse de la lumière}$$

La fréquence est en relation directe avec l'énergie de l'onde électro-magnétique :

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

Où E est l'énergie de l'onde et h la constante de Planck qui vaut $6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s.

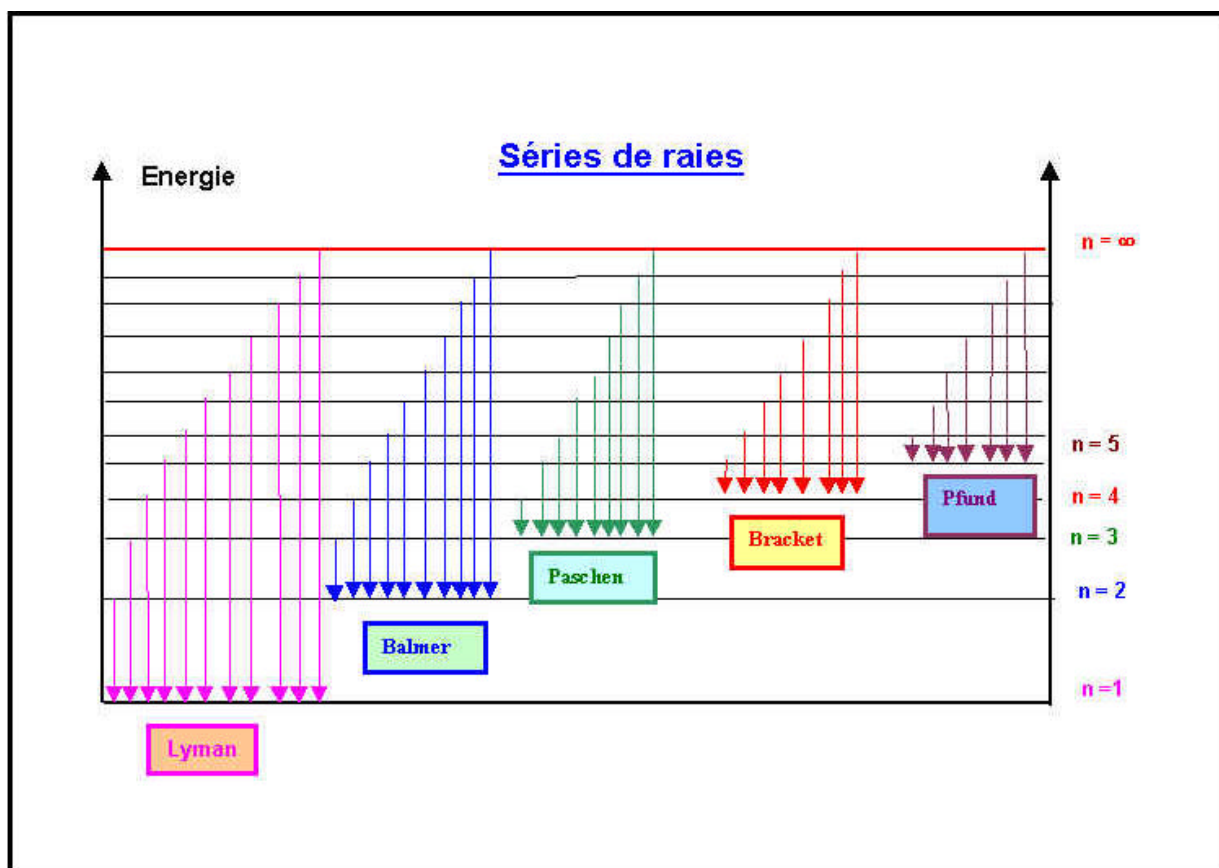
Si un atome d'hydrogène, composé d'un noyau (un seul proton) et d'un électron, reçoit de l'énergie, par exemple en étant chauffé, l'électron, situé à l'origine sur le premier barreau, sur le niveau d'énergie le plus proche du noyau (niveau dit « fondamental »), passe à un niveau supérieur, monte l'échelle en utilisant les barreaux.

Cet état « excité » de l'électron n'est pas stable. L'électron aura tendance à revenir à son niveau fondamental. Il émettra alors son surplus d'énergie, correspondant exactement à la différence d'énergie des deux niveaux. Ce photon émis, ayant une énergie déterminée, aura une longueur d'onde (donc une fréquence) spécifique. Cette longueur d'onde se retrouvera dans le spectre de l'hydrogène.

Les niveaux d'énergie d'un atome d'hydrogène sont aussi nombreux que l'on veut. Le niveau infini correspond à un électron totalement désolidarisé de son noyau. On dit alors que l'atome est ionisé. Il est porteur d'une charge positive, l'électron étant porteur d'une charge négative.

Dans la pratique, la distance du noyau à partir de laquelle l'atome est ionisé est très petite, et l'« infini » dont il était question plus haut n'est pas très grand.

Les raies d'un spectre sont donc représentatives des sauts d'énergie des électrons excités. Elles sont classées en séries en fonction du niveau sur lequel les électrons retournent. Si les électrons retournent sur le niveau fondamental (niveau 1), on a affaire à la série de raies de « Lyman », du nom de son découvreur. Si les électrons retournent au niveau 2, les raies sont dites de « Balmer », et ainsi de suite selon le schéma ci-dessous.



Les raies de Lyman sont dans l'infrarouge, celles de Balmer dans le visible (elles contiennent pour l'hydrogène les célèbres raies $H\alpha$, $H\beta$, $H\gamma$,...). Les autres séries sont dans l'ultraviolet.

Ce modèle fonctionne très bien pour l'hydrogène, mais est mis en défaut dès que plusieurs électrons sont présents dans un même atome. Sommerfeld a amélioré ce modèle en transformant les orbites circulaires des électrons en orbites elliptiques. Mais ce nouveau modèle trouve aussi rapidement ses limites.

Il faudra attendre la mécanique quantique pour trouver la solution théorique s'ajustant parfaitement aux observations. Cette solution fait appel aux orbitales électroniques déterminées grâce aux fonctions d'ondes de Schrödinger. Cette théorie est extrêmement compliquée, et n'est pas l'objet de cet exposé.

Pour faire simple, pour ne pas dire simpliste, les électrons sont présents statistiquement dans des zones à trois dimensions (les orbitales) dont l'énergie est caractéristique. Le niveau fondamental est sphérique (et montre que le cas d'un seul électron fonctionne), les autres ont des formes géométriques compliquées, comme des tores, des « gouttes d'eau », des lobes, ou des associations de ces formes élémentaires.

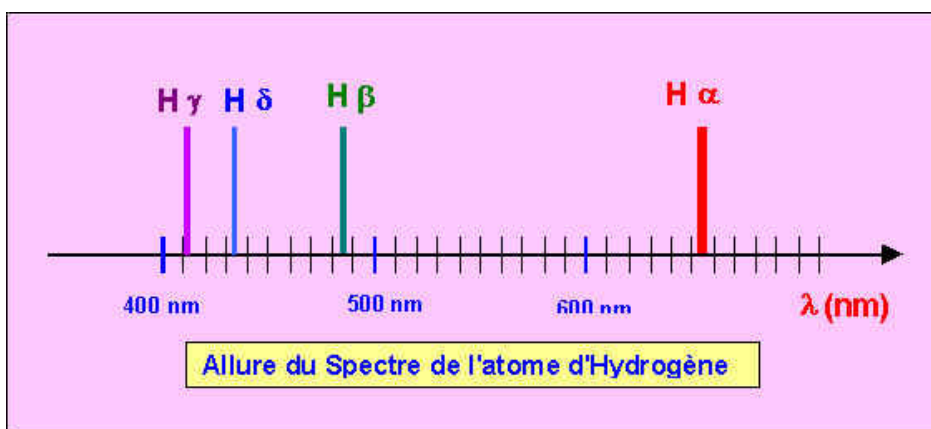
Le spectre continu

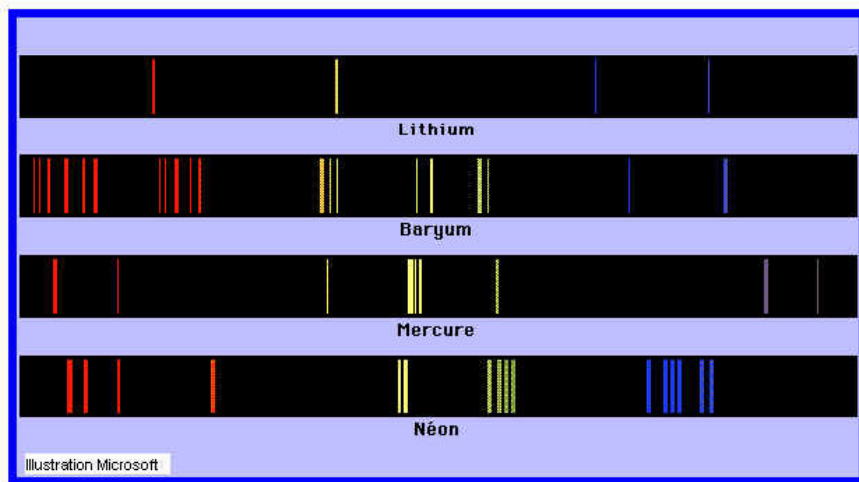
Un filament de lampe, chauffé par un courant électrique, émet un spectre continu, composé d'un mélange inextricable de toutes les longueurs d'ondes. Dans le visible, cette lumière est « blanche », une tentative de séparation des raies individuelles se solde par un spectre coloré de type arc-en-ciel. Le Soleil émet, entre autre, ce type de spectre visible en fond de l'illustration du spectre d'absorption.

Le spectre d'émission

Supposons une excitation d'un gaz pur, par exemple l'hydrogène. Des raies brillantes vont apparaître sur le spectre, sans fond continu, car seul l'élément hydrogène est présent. L'image ci-dessous représente les quatre principales raies très connues de l'hydrogène. On retrouvera ces raies un peu partout dans l'Univers, l'hydrogène y étant présent à 75 %.

A noter que ces raies ne sont pas les seules. Le spectre de l'hydrogène, le plus simple des éléments est déjà très compliqué.





Cette illustration montre les raies caractéristiques et principales des éléments Lithium, Baryum, Mercure et Néon.

On note que l'allure du spectre est caractéristique de l'élément, c'est en quelque sorte sa signature.

Spectres d'émission de quelques atomes
(illustration tirée de l'encyclopédie Microsoft Encarta)

Le spectre d'absorption

Supposons une étoile comme le Soleil, émettant dans toutes les longueurs d'ondes un spectre continu. Si l'on interpose un gaz, par exemple l'hydrogène, entre la source et l'observateur, cet hydrogène va « absorber » la lumière aux longueurs d'ondes correspondant à ce gaz. Dans le spectre, cette lumière va disparaître, et l'on obtiendra un spectre d'absorption avec des raies sombres.

Ce spectre est celui du Soleil qui émet un spectre continu. Les bandes d'absorption sont caractéristiques de son atmosphère, qui s'interpose entre l'émission et nous.



La présence de certaines raies dans un spectre de l'étoile voudra dire que l'élément correspondant est présent.

L'intensité relative des raies sera représentative de la quantité de l'élément présent.

Que nous apprend un spectre ?

Faire un spectre d'une étoile, veut dire d'abord décomposer sa lumière. Ceci s'obtient à l'aide soit d'un prisme, soit, de façon plus moderne et plus efficace, grâce à un réseau de diffraction.

La lumière étant étalée par le réseau, il faudra une certaine quantité de lumière pour impressionner les caméras des spectrographes. Les étoiles très faible ne pourront donner de spectre exploitable, car trop peu de leur lumière ne nous parvient.

La composition chimique

Le premier renseignement exploitable en analysant un spectre d'étoile est sa composition chimique. En effet, la position des raies est caractéristique des éléments chimiques présents dans son atmosphère. De plus, l'intensité des raies est représentative des proportions de l'élément. On sait ainsi que le Soleil a sensiblement la même composition que le reste de l'Univers, à savoir, trois quarts d'hydrogène, un quart d'hélium, et des traces des autres éléments.

La vitesse

Certaines raies ou ensembles de raies (par exemple les quatre raies principales de l'hydrogène) sont facilement reconnaissables sur un spectre, mais peuvent être décalées en longueur d'onde par rapport au même élément analysé sur Terre.

Ce phénomène est dû à la vitesse de rapprochement ou d'éloignement de l'objet, et est plus connu sous le terme de Red Shift (décalage vers le rouge). L'étude de ce Red Shift nous donne donc la vitesse de l'objet par rapport à la Terre. Ce phénomène a permis de constater expérimentalement que les galaxies s'éloignent les unes des autres, et donc que l'Univers est en expansion.

La classe spectrale

L'allure générale du spectre d'une étoile permet de la ranger dans l'une des classes spectrales qui ont par ailleurs des caractéristiques communes.

Les étoiles sont classées selon leur température de surface. Les classes principales sont, des plus chaudes aux plus froides : O, B, A, F, G, K, M. S'ajoutent les très chaudes (W), et les très froides (C, S).

Pour affiner l'analyse, des sous classes existent, notées de 0 à 9 (B0, M5...)

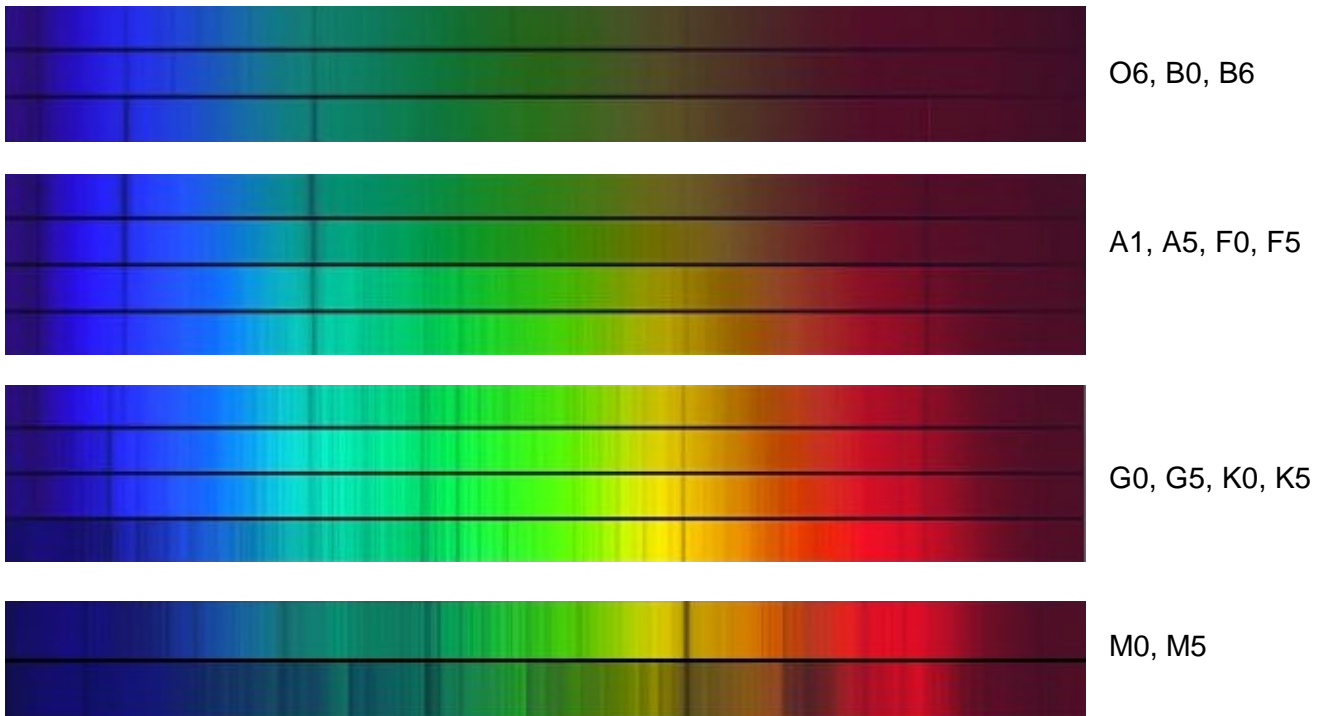
Classe spectrale	Masse	Rayon	Luminosité	Température de surface (en degrés K)	Durée de vie (en millions d'années)	Abondance relative (en %)
W	>40	20	1.000.000	50.000	<1	négligeable
O5	32	18	600.000	40.000	1	0.00002
B0	16	7.4	16.000	28.000	10	
B5	6.5	3.8	600	15.500	100	0.1
A0	3.2	2.5	60	9.900	500	
A5	2.1	1.7	20	8.500	1.000	1
F0	1.75	1.4	6	7.400	2.000	
F5	1.25	1.2	3	6.600	4.000	3
G0	1.06	1.1	1.3	6.000	10.000	
<i>G2 Soleil</i>	1	1	1	5.800	12.000	
G5	0.92	0.9	0.8	5.500	15.000	9
K0	0.80	0.8	0.4	4.900	20.000 (1)	
K5	0.69	0.7	0.1	4.100	30.000	14
M0	0.48	0.6	0.02	3.500	75.000	
M5	0.20	0.3	0.001	2.800	200.000	73
C	~5 à 10	(2)	(2)	~2500	0.1	négligeable
S	~5 à 10	(2)	(2)	~2000	0.1	négligeable

On voit que la détermination de la classe permet de connaître la luminosité absolue (qui permettra d'en déduire la distance avec la mesure de la magnitude apparente), la masse, le rayon (donc la densité moyenne), la durée de vie de l'étoile.

Le Soleil est une étoile de classe G2.

A noter également que les étoiles peu chaudes, petites, peu lumineuses, et donc peu facilement repérables, sont largement majoritaires.

Voici quelques exemples de spectres de différentes classes. On note que plus l'étoile est chaude, plus les raies larges, importantes sont situées dans le bleu, aux hautes énergies.



Le tableau suivant donne quelques éléments de la composition des étoiles selon leur classe :

Classe	Raies principales	Autres raies
W	Hélium ionisé, hydrogène	Carbone, et Oxygène (classe WC) Azote (classe WN)
O	Hélium ionisé	Hélium neutre, faibles raies de l'hydrogène
B	Hélium neutre	Raies de l'hydrogène se renforçant dans les classes B6 à B9
A	Hydrogène très visibles en A0, allant en décroissant vers A9	Raies du calcium ionisé de plus en plus fortes de A0 vers A9
F	Raies du calcium ionisé de plus en plus fortes	
G	Raies du calcium ionisé très marquées	Métaux, particulièrement le Fer
K	Fortes raies métalliques	Molécules CH et CN
M	Raies d'absorption de l'oxyde de titane	Nombreuses raies métalliques
C	Raies métalliques	Carbone
S	Raies métalliques	Oxyde de Zirconium, Yttrium, Baryum

Vitesse de rotation des étoiles

Le spectre d'une étoile nous renseigne également sur sa vitesse de rotation sur elle-même. En effet, l'un des bords de l'étoile s'éloigne de nous, l'autre se rapproche. Les raies sont élargies par effet du Red Shift. L'élargissement de la raie donnera la vitesse de rotation.

Rappel : la position moyenne de la raie large donnera la vitesse d'éloignement ou de rapprochement de l'étoile.

Etoiles doubles spectroscopiques

De même, deux étoiles liées gravitationnellement mais non séparées par les instruments pourront donner un dédoublement des raies, si la première étoile s'éloigne de nous, et la deuxième se rapproche.

Autres effets

Citons enfin que des données concernant le champ magnétique ou la polarisation de la lumière peuvent être déduites des spectres.