

L'art de classer les étoiles par leur spectre lumineux

Inspiré par le calendrier spectroscopique 2021
de Pierre Laporte du Centre d'observation Astronomique Des Monts Notre-Dame

Pat Browne
12 Nov 2021

Calendrier de 2021 - La spectroscopie par les amateurs

LHIRES III

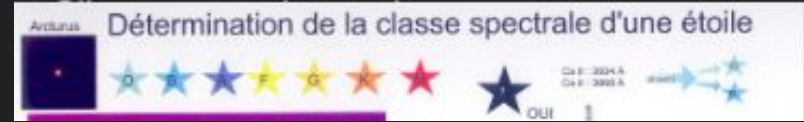


« Ce projet de calendrier 2021 vise deux objectifs:

- de faire l'état de nos réalisations et de nos étapes d'apprentissage
- offrir des schémas et des illustrations de nos expériences dans ce domaine rarement abordé par des amateurs »

Calendrier 2021 du COAMND
(Centre d'Observation Astronomique des Monts Notre-Dame)

Le mois de Septembre 2021



SPECTROSCOPIE DE SEPTEMBRE

Détermination de la classe spectrale d'une étoile

Les sept classes spectrales classiques sont identifiées par des lettres ordonnées de la plus chaude à la plus froide (O, B, A, F, G, K, M). La phrase « *Oh, Be A Fine Girl, Kiss Me* » est utilisée fréquemment dans les livres d'astronomie pour faciliter la mémorisation.

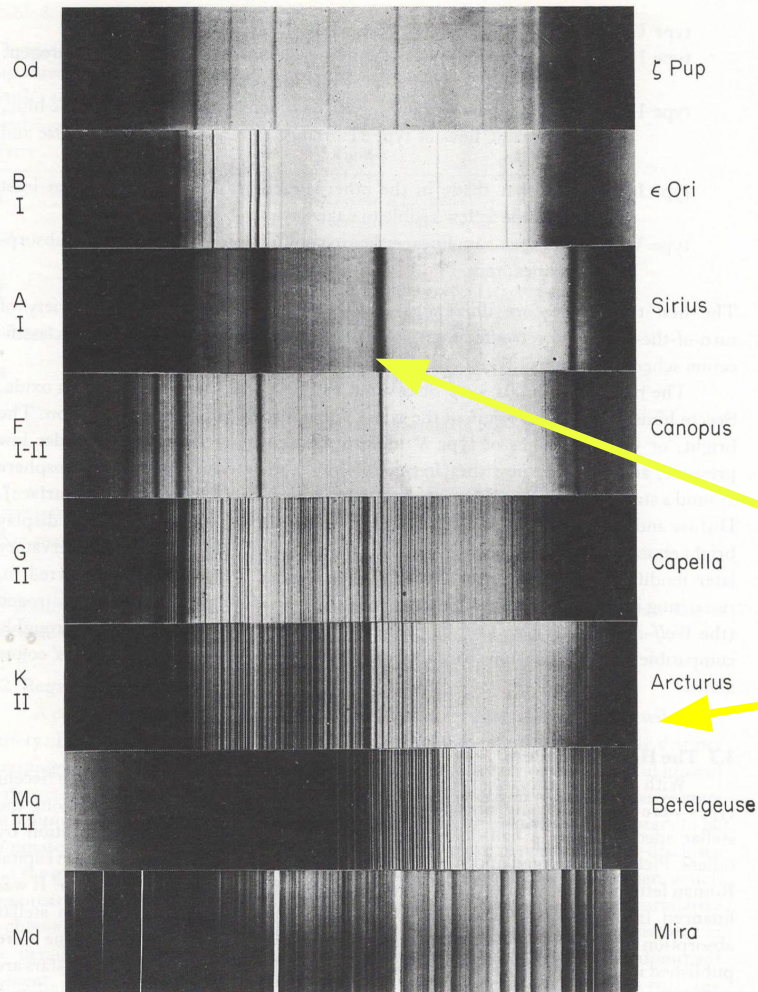


Figure 3.2.

Exemples des 7 classes spectrales classiques: O, B, A, F, G, K, M

Raies d'absorption dans les longueurs d'ondes spécifiques reliées aux éléments chimiques

Raies d'absorption avec largeurs différentes

Arcturus - classe spectrale K II
II (sous-classe de luminosité)

L'ordre(O->M) est en décroissance de la température

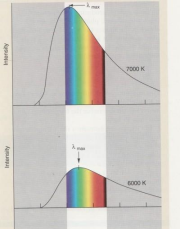
Les 7(+) classes spectrales *classiques*

Les sept classes spectrales classiques sont identifiées par des lettres ordonnées de la plus chaude à la plus froide ([W] O, B, A, F, G, K, M).

$\underbrace{W}_{\text{Willie,}} - \underbrace{O}_{\text{Oh}} - \underbrace{B}_{\text{Be}} - \underbrace{A}_{\text{A}} - \underbrace{F}_{\text{Fine}} - \underbrace{G}_{\text{Girl}} - \underbrace{K}_{\text{Kiss}} - \underbrace{M}_{\text{Me !}}$
---- Température décroissante ---->

Type spectrale	Couleur	Température moyenne de surface (°C)	Raies les plus intenses	Notation spectrale des raies
W	bleue	35000-50000	nombreuses raies d'émission	HeII, HI=H α , H β
O	bleue-blanche	25000-35000	hélium ionisé	HeII
B	bleue-blanche	10000-25000	hélium neutre	HeI
A	blanche	7500-10000	prédominance des raies de l'hydrogène (série de Balmer)	HI
F	jaunâtre	6000-7500	nombreuses raies de métaux ionisés : calcium ionisé...	CaIV
G	jaune	5000-6000	présence simultanée de raies de métaux neutres et de métaux ionisés : calcium...	Ca, CaIV
K	orange	3500-5.00	raies de métaux neutres et d'oxydes de titane	Fe, TiO
M	rouge	<3500	bandes d'oxydes de titane	TiO

Profil spectral: La signature comprend certaines raies d'absorption



Continuous spectrum



Absorption spectrum of sodium (Na)



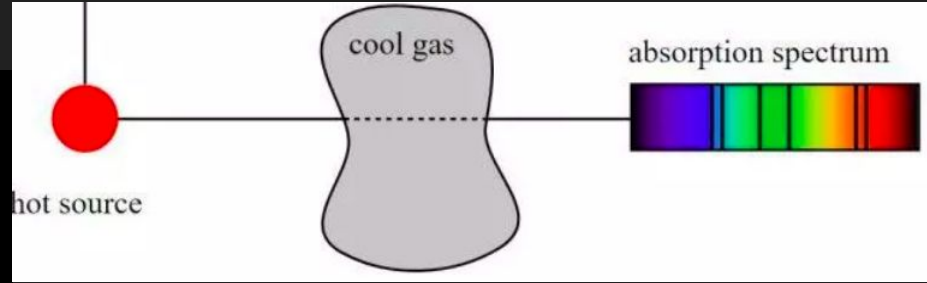
Absorption spectrum of mercury (Hg)



Absorption spectrum of lithium (Li)



Emission spectrum of lithium (Li)



Une raie spectrale d'absorption est une ligne sombre dans un spectre électromagnétique autrement uniforme et continu.

- l'interaction entre un système quantique des atomes, parfois aussi des molécules et le rayonnement électromagnétique

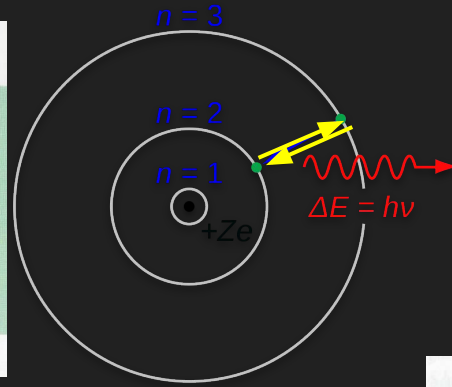
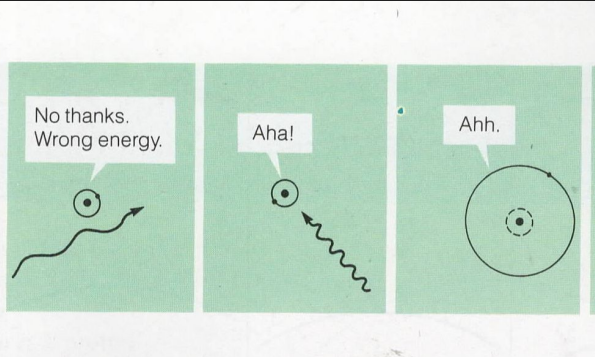
Selon la composition chimique du gaz, le spectre comprend des raies noires correspondant aux longueurs d'onde absorbées

Démonstration: raies dans des spectres des étoiles différentes:

[Vidéo Éléments Chimiques dans les Spectres](#)

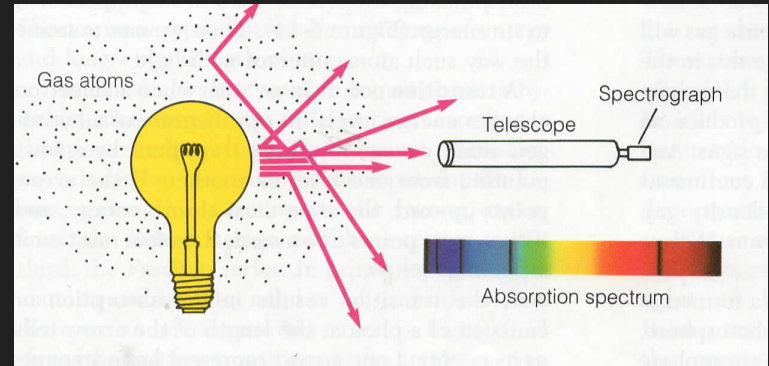
L'absorption de lumière: L'énergie du système est quantifié

Un atome ne peut absorber un photon que s'il a la bonne quantité d'énergie.



L'atome excité est instable et, en une fraction de seconde, il revient à un niveau d'énergie plus faible. Le photon réémis dans cette transition est envoyé dans une direction aléatoire. Il n'atteint pas le télescope; nous observons une raie d'absorption à cette longueur d'onde.

$E_2 - E_1 = h\nu$
h: la constante de Planck
v: la fréquence de l'onde électromagnétique



La série de Balmer:

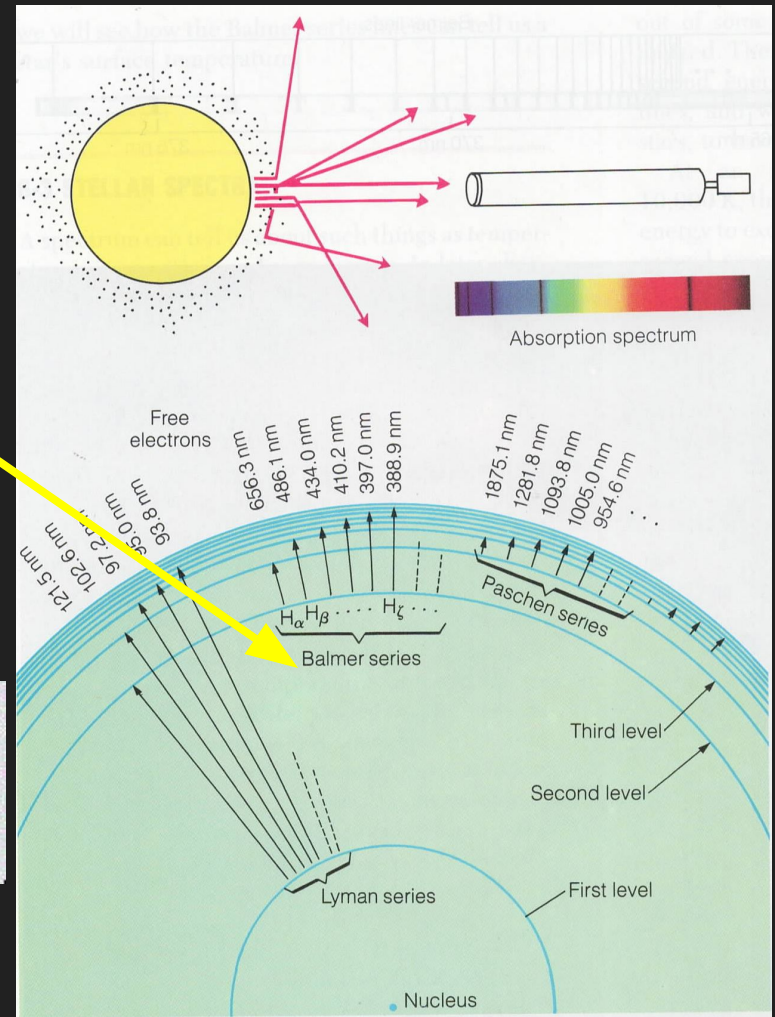
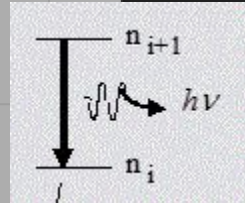
H α , H β , H γ , H δ

Cette série est dans le domaine du visible.

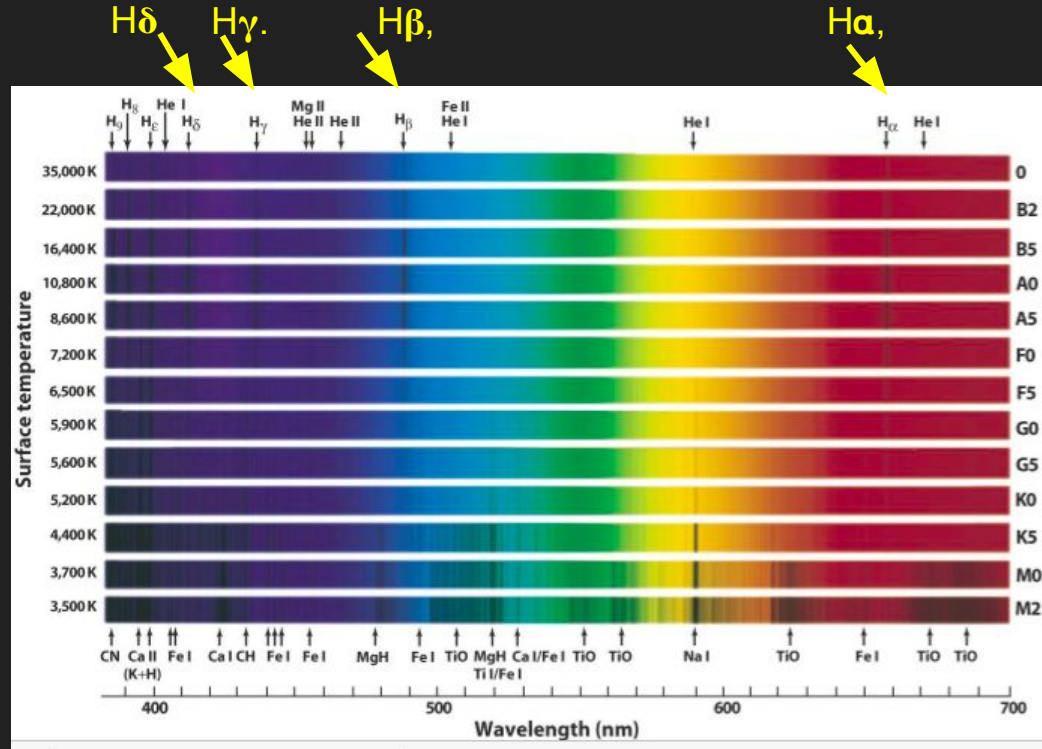
Les transitions de Balmer commencent à partir du deuxième niveau d'énergie, E2

$$\Delta E = h\nu = 13,6 \left[\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right] \text{ eV}$$

Hα	E2 -- E3	683.3 nm
Hβ	E2 -- E4	486.1
Hγ	E2 -- E5	434.3
Hδ	E2 -- E6	410.2



Profil des éléments à travers les 7 classes spectrales



O
B
A
F
G
K
M

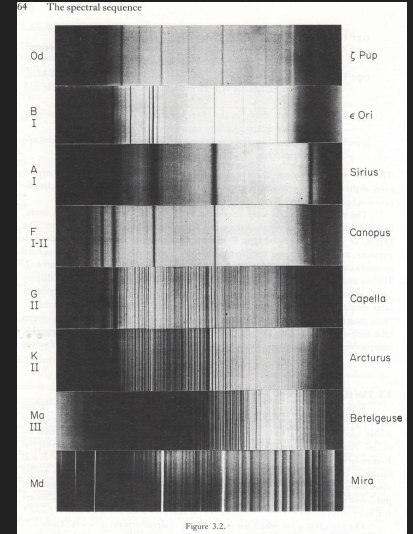
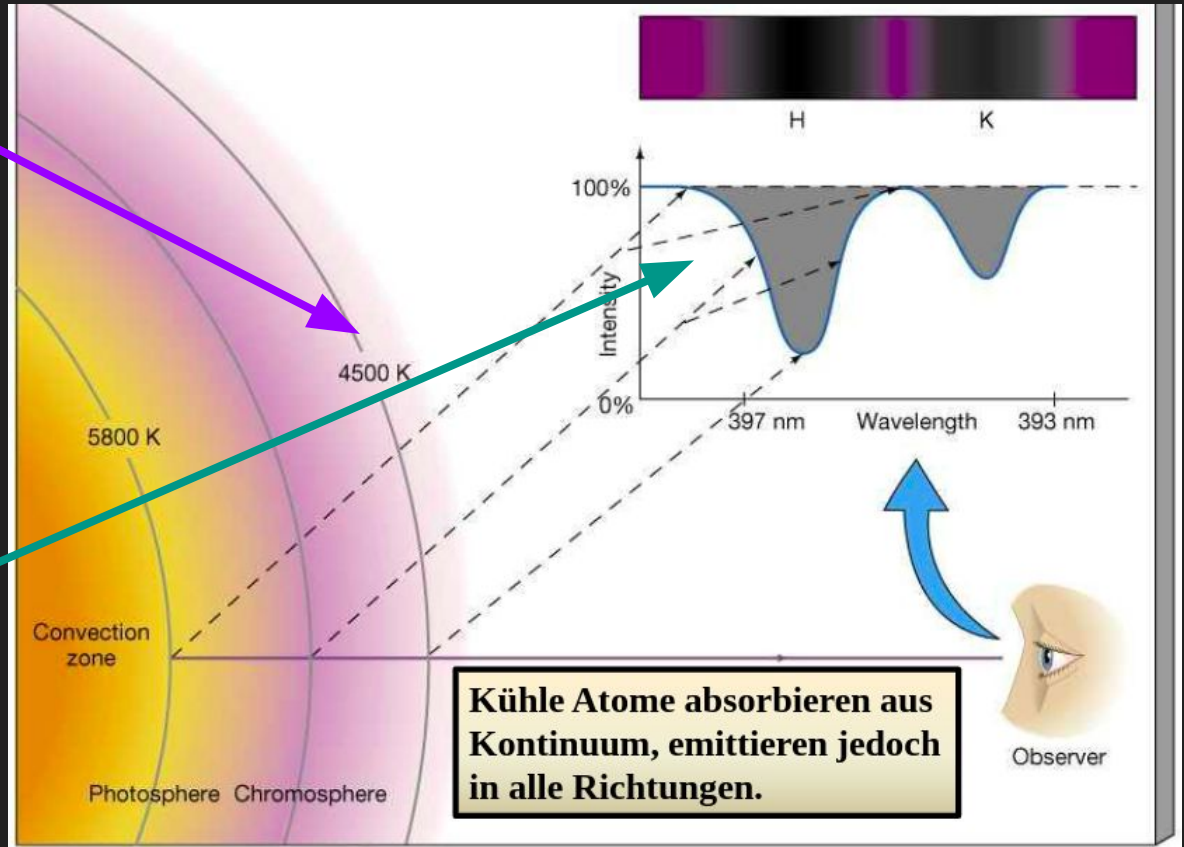


Figure 3.2.

Formation des raies d'absorption de différentes largeurs

- Les gaz atmosphériques froids absorbent les raies de lumière.
- Lorsque la lumière traverse un gaz dans l'atmosphère, une partie de la lumière à certaines longueurs d'onde est diffusée,
- ...ce qui donne des bandes plus sombres.

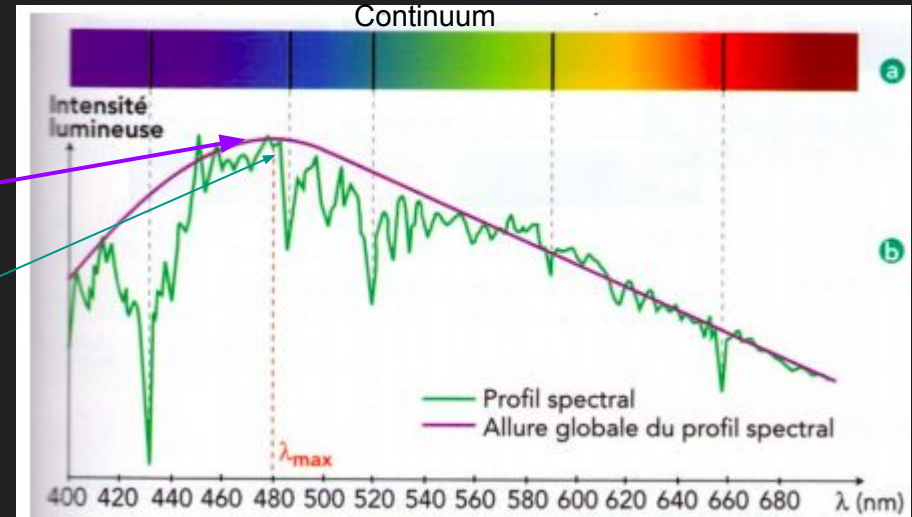


Anatomie d'une raie spectrale: Largeur équivalente (EW)

- La largeur équivalente (EW) d'une raie spectrale est la mesure de la surface comprise dans la raie spectrale. Son nom vient du fait qu'elle correspond à la largeur d'une raie ayant la même surface, mais qui aurait une forme rectangulaire .
- On mesure la surface qui est formée entre la courbe de la lumière continue émise par l'étoile et la courbe d'absorption

Courbe d'intensité du continuum

Courbe de la raie d'absorption



Calcul de la largeur équivalente d'un raie d'absorption

On prend la différence de l'intensité du profil de la ligne et du continuum constant . On fait intégration de tous ces éléments.

Un standard: On compare les largeurs équivalentes des raies spectre afin de déterminer leurs abondances, c.a.d les proportions de ces éléments dans l'atmosphère de l'étoile.

$$\frac{1}{F_o} \int_A^B (F_o - F_\lambda) \delta \lambda$$

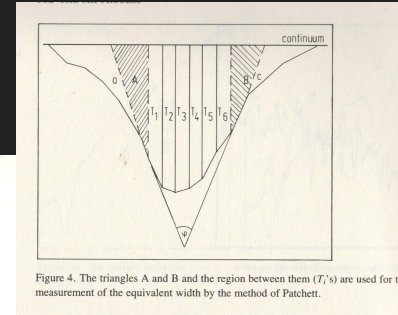
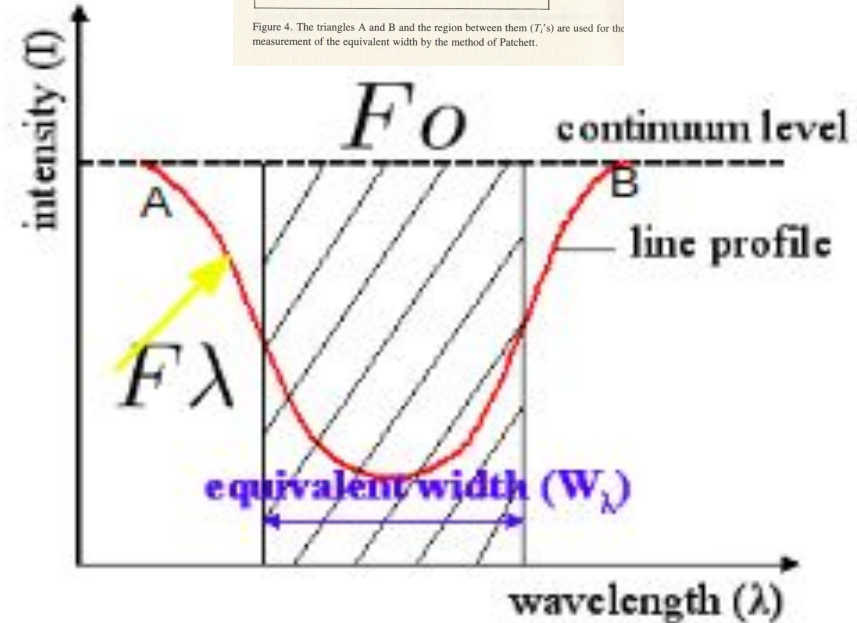


Figure 4. The triangles A and B and the region between them (T_i 's) are used for the measurement of the equivalent width by the method of Patchett.



« La carte d'identité » d'Arcturus

« Les éléments chimiques considérés sont le calcium (Ca II), l'hydrogène (H γ), le manganèse (Mn), le méthylidyne (CH-) et le monoxyde de titane (TiO). L'abondance des ces éléments chimiques dans une étoile se reflète dans le profil de leur raies d'absorption.

En mesurant la largeur équivalente de ces raies d'absorption on peut établir des rapports. La page du mois de septembre démontre comment, en tenant compte de ces ratios, Arcturus est du type K.

Une clé dichotomique a été développée afin d'élaborer davantage la classe spectrale d'une étoile à partir des caractéristiques précises de son profil spectral. Cette clef est basée sur la présence ou l'absence de raies d'absorption. »

... Pierre Laporte COAMND

Les classes spectrales: Comment les déterminer ?

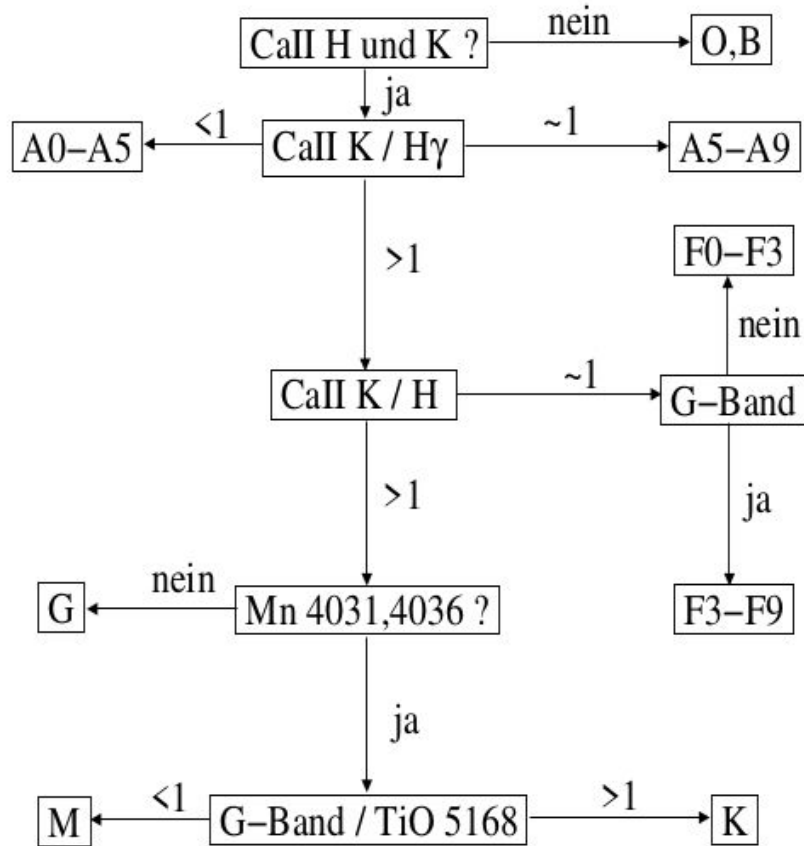
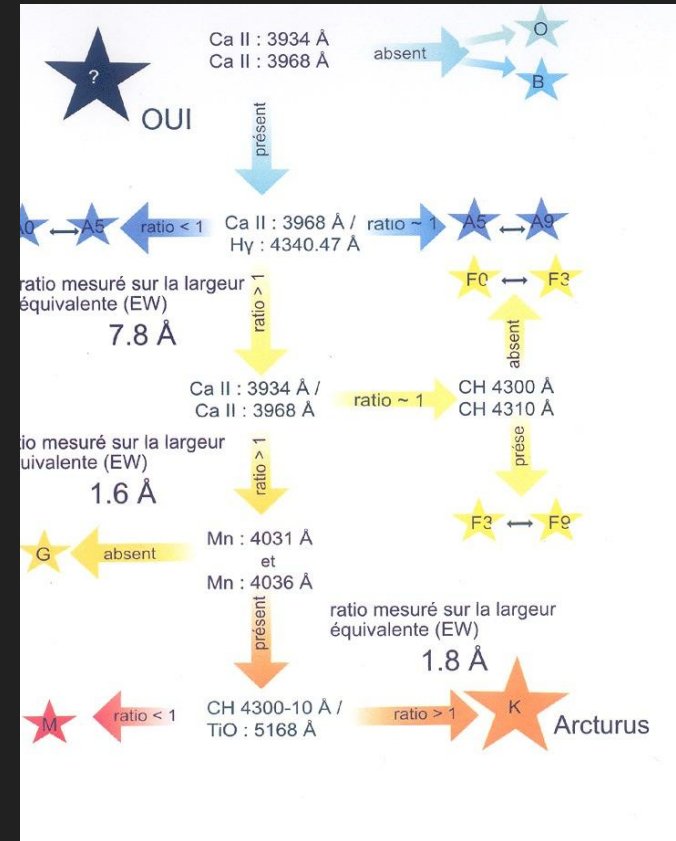


Abbildung 4: Flussdiagramm zur Bestimmung der Spektralklassen.



Exercice: Déterminer la classe spectrale de l'étoile à l'étude: Arcturus

Étape 1: Prends le rapport de la largeur équivalente (EW) entre:
CA II et H γ (série Balmer)

présent
↓
Ca II : 3968 Å
H γ : 4340.47

$$\frac{EW(CAII)_{3968}}{EW(H\gamma)} = \frac{4.02A^\circ}{0.84A^\circ} = 4.78$$



Ca II : 3934 Å
Ca II : 3968 Å

présent

< 1 Ca II : 3968 Å
Hy : 4340.47

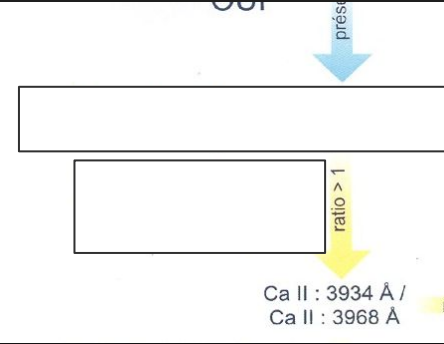
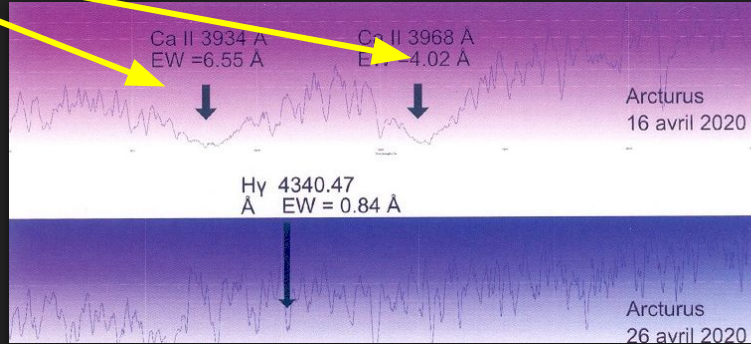
largeur

ratio > 1

Ca II : 3934 Å /
Ca II : 3968 Å

Étape 2: Rapport entre 2 largeurs équivalentes de
des 2 raies de CaII à des longueurs d'ondes différentes

$$\frac{EW(CaII)_{3934}}{EW(CaII)_{3968}} = \frac{6.55 \text{ Å}^{\circ}}{4.02 \text{ Å}^{\circ}} = 1.6$$



Ca II : 3934 Å
Ca II : 3968 Å

présent



< 1 Ca II : 3968 Å
Hy : 4340.47 Å

largeur
ratio > 1



Ca II : 3934 Å /
Ca II : 3968 Å

largeur
ratio > 1

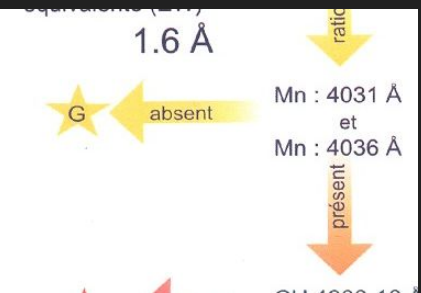
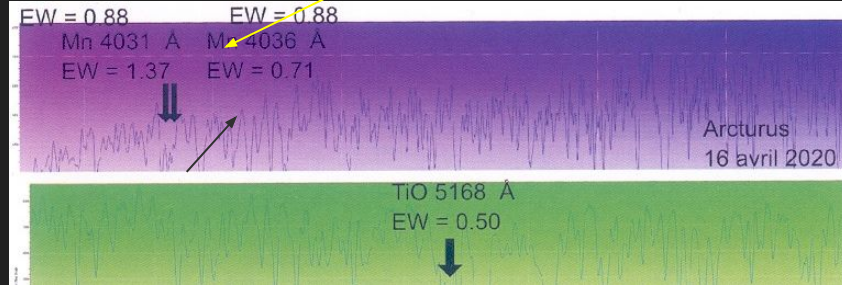


Mn : 4031 Å
et
Mn : 4036 Å

présent



Les raies MN_{4031A} et MN_{4036A} sont-elles présentes?



Ca II : 3934 Å
Ca II : 3968 Å



< 1 Ca II : 3968 Å
Hy : 4340.47



Ca II : 3934 Å /
Ca II : 3968 Å



Mn : 4031 Å
et
Mn : 4036 Å

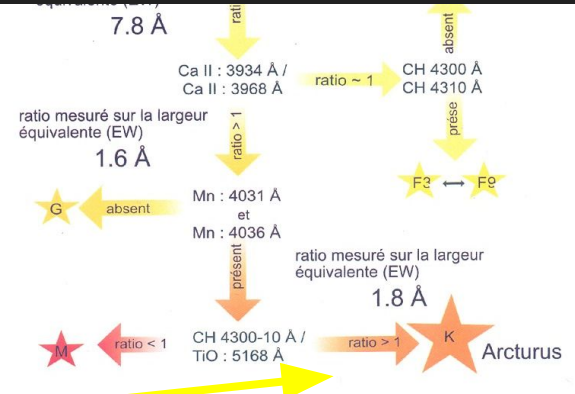
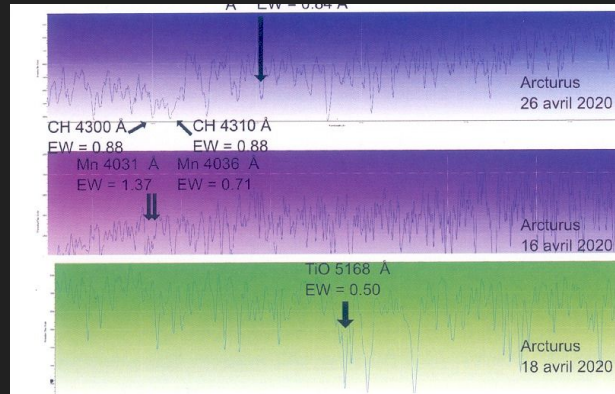


CH 4300-10 Å /
TiO : 5168 Å

Rapport $\text{CH}_{4300\text{Å},4310\text{Å}} / \text{TiO}_{5168\text{Å}}$

Est-ce que le rapport est supérieur à 1 ?... « ja »!

Donc, Arcturus appartient à la classe spectrale K



Classer les objets sur le terrain: c'est un art et également une science

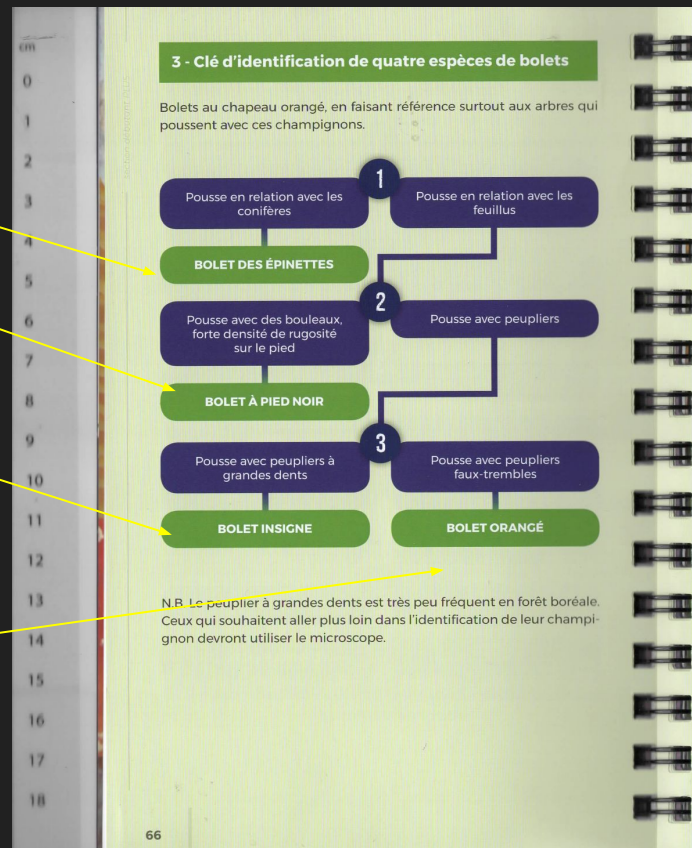


Bolet des
épinettes ?

Bolet à pied
noir?

Bolet
insigne ?

Bolet
orangé?



Résumé

Classer une étoile est un bon exercice pour un spectroscopiste amateur. La page de septembre du calendrier du COAMND montre le processus de classification d'une étoile, Arcturus qui se retrouve dans la classe spectrale K

Les éléments chimiques qui sont présents et la puissance (largeur) des raies nous en disent beaucoup au sujet des atmosphères stellaires.

Déterminer la classe spectrale d'une étoile implique l'examen des raies d'absorption (ou d'émission) des éléments clés

- Les raies spectrales sont le résultat de l'interaction entre un système quantique et le rayonnement électromagnétique.
- Les largeurs équivalentes des raies sont requises pour normaliser les données.

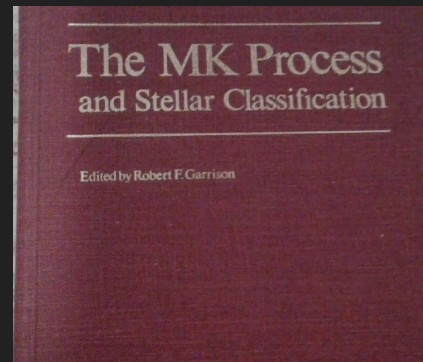
Le processus qui suit le parcours d'un clé dichotomique pourrait être une outil dans notre trousse pour tenter de classer nos spectres.

Questions ou commentaires

Commentaires ...

Nuance des mots: « classer » par opposition à « classifier »

- La personne qui utilise une classification existante pour catégoriser des objets devrait généralement utiliser le verbe *classer*:
 - « ... un type spectral doit toujours être basée sur la vérification de nombreux critères qui en cas de doute devraient être validés par la littérature. » -- (*Spektren de Sterne Harvard...*)
- La personne qui établit les critères de classification devrait définitivement utiliser le verbe classer.
 - Ce sont les astronomes professionnels.
- La littérature: Le *Processus* MK (classification de Morgan et Keenan)
 - colloque sur les processus de classification stellaire
 - l'extension sur la classification Harvard:



Tiré de l'Introduction au système MK, p. 7

Un des buts (avec lequel la plupart d'entre nous qui s'engage dans cette activité nous y consacrons tout notre temps) est ce qu'on appelle *calibration* des données. C'est-à-dire assigner une valeur numérique à des paramètres techniques – disons par exemple la température requise pour obtenir un certain paramètre observé – disons la largeur équivalente d'une ligne de silicium (ou d'autre chose ...). Le deuxième objectif (au sujet duquel peu d'entre nous osent s'aventurer) est de *critiquer* la théorie. **L'idée de base ici est de trouver ce qui fonctionne et ce qui ne fonctionne pas.**

Qu'est-ce qui ne fonctionne pas avec le système MK ?

D'abord, je désire commencer par une incompréhension laquelle j'espère n'est pas partagée par plusieurs. Il a été dit que lorsque la classification est faite par inspection visuelle d'un spectrogramme le procédé est purement subjectif, et que la personne qui fait la classification est libre de faire des changements arbitraires dans le modèle de classification des étoiles. Ce n'est pas vrai !

C'est subjectif dans le sens que l'habileté de l'œil humain est utilisée pour associer des patterns complexes, mais le réseau de patterns définissant le système est le même que la comparaison soit faite visuellement , OU par sommation de mesures, OU en utilisant un indice électronique de reconnaissance des modèles [organigramme].

Si moi ou n'importe qui d'autre faisait des changements arbitraires à un système, ce système perdrait rapidement son utilité. (...Philip Keenan, p. 29)