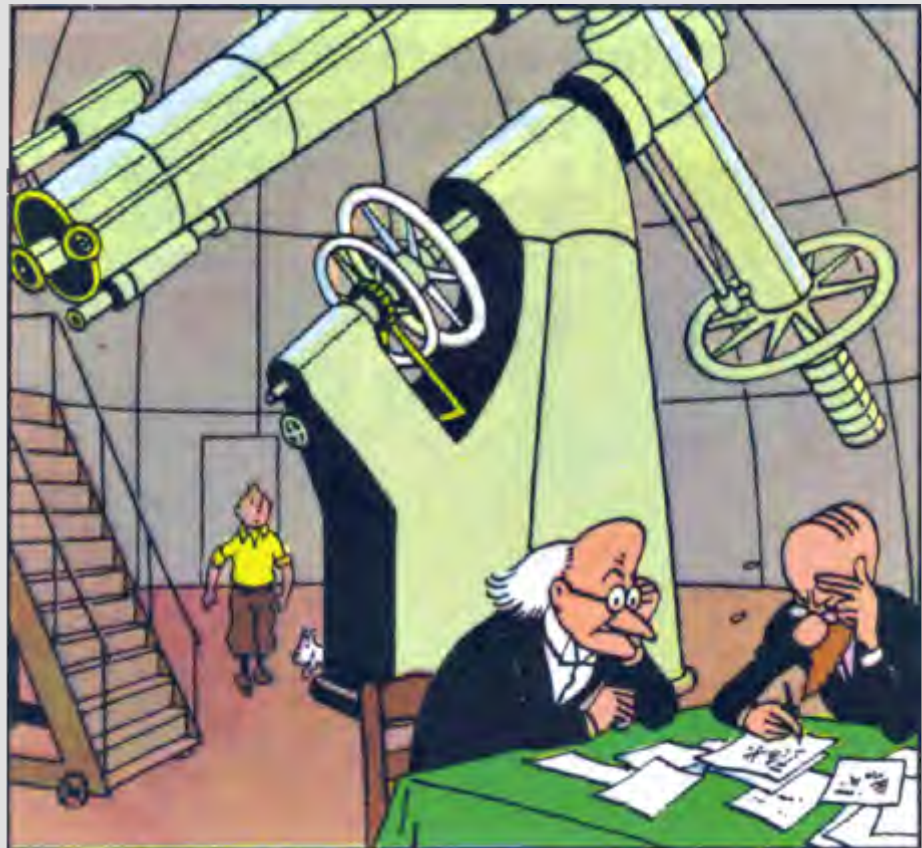


Comprendre le langage des étoiles

Sergio Ilovaisky
Observatoire de Haute-Provence

Médiathèque d'Herbès
Manosque
19 avril 2012



L'Etoile Mystérieuse (Hergé)

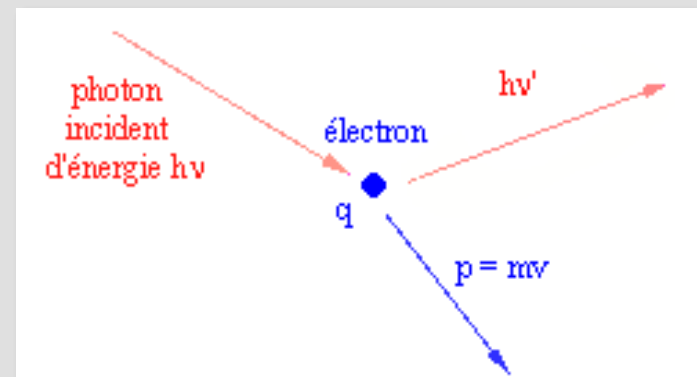
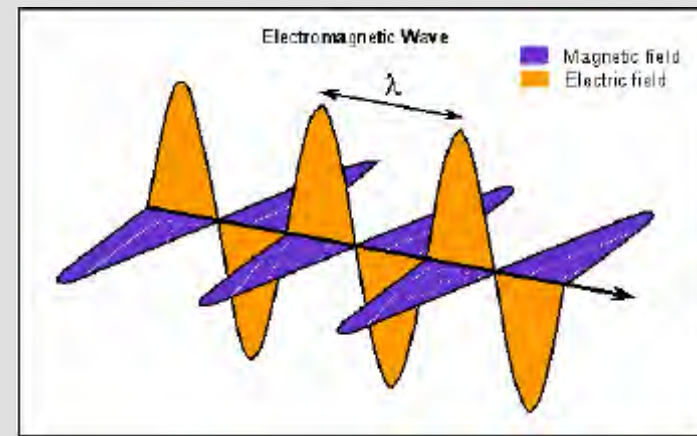
C'est quoi la lumière ?

C'est un rayonnement électromagnétique qui se présente à la fois comme une *onde* (**James Maxwell** 1864) et comme une particule sans masse, le *photon* (**Albert Einstein** 1905).

Ce rayonnement voyage avec une vitesse dans le vide de $c = 300\,000\text{ km/s}$.

Il est caractérisée par la longueur de l'onde associée λ et/ou par l'énergie du photon associé $E = h c/\lambda$.

Le rayonnement auquel l'œil humain est sensible est appelé « lumière ».

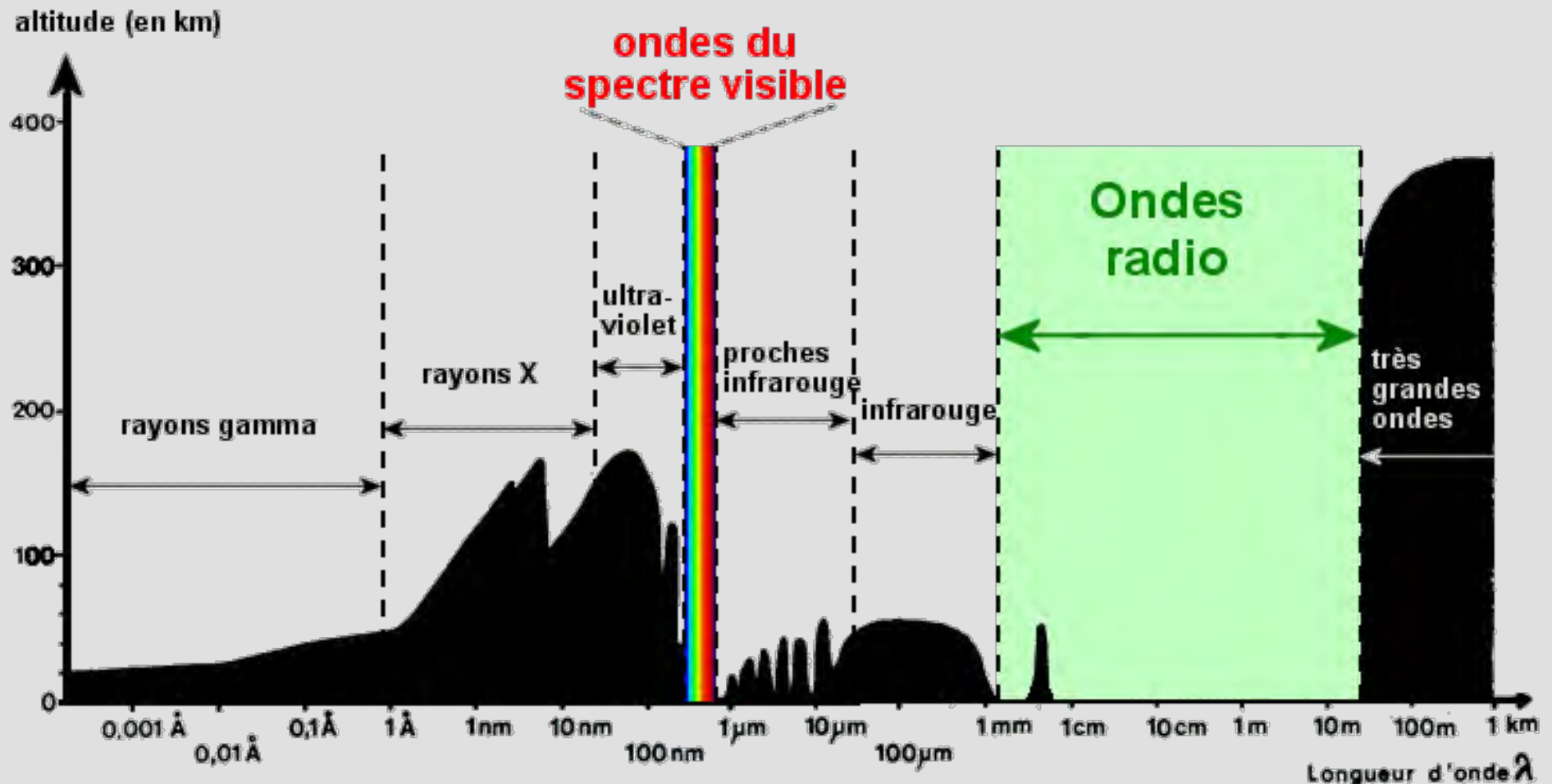


Dans l'effet **Compton** un photon frappe un électron et se comporte donc comme une particule.

Le spectre électromagnétique

D'autres rayonnements existent, allant des rayons gamma et rayons X aux ultraviolets. Des rayonnements de plus grande longueur d'onde que la lumière visible vont depuis les infrarouges et les micro-ondes aux ondes radio.

Seules les ondes visibles et les ondes radio arrivent jusqu'au sol



La lumière des étoiles



La lumière qui nous vient des étoiles porte en elle un **message codé** !

Pour le décoder nous devons séparer la lumière en ses couleurs élémentaires : on appelle cela former un **spectre**.

Un spectre dans la nature

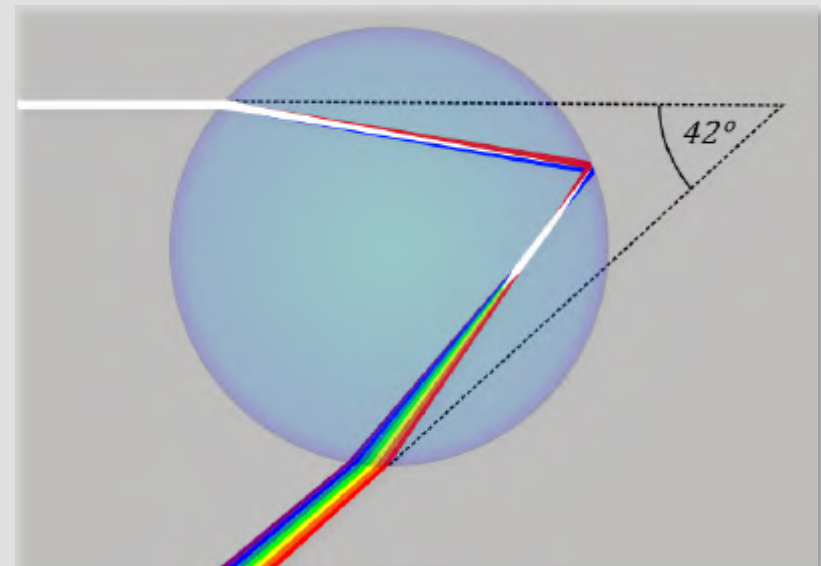


Le spectre le plus simple est l'arc-en-ciel : ce sont les gouttelettes de pluie qui séparent la lumière du soleil.

On appelle "dispersion" la séparation de la lumière en couleurs élémentaires.

La vitesse de la lumière dans un milieu dépend de sa couleur : c'est la **réfraction** (accompagnée ici par une réflexion interne dans la goutte).

La réfraction a été découverte en 1602.



Les couleurs de la lumière



La dispersion de la lumière par un prisme a été utilisée par **Isaac Newton** en 1666 pour montrer que la lumière blanche était composée de toutes les couleurs.

C'est Newton qui a expliqué l'origine de l'arc-en-ciel.



Le secret des spectres

C'est au début du 19ème siècle que l'on a découvert le secret des spectres : il manquaient certaines couleurs dans le spectre du soleil et des étoiles !

Mais il a fallu attendre le 20ème siècle pour comprendre *pourquoi*. C'est le développement de l'astrophysique : l'application des lois de la physique à l'astronomie.



L'Etoile Mystérieuse (Hergé)

Que contient un spectre ?



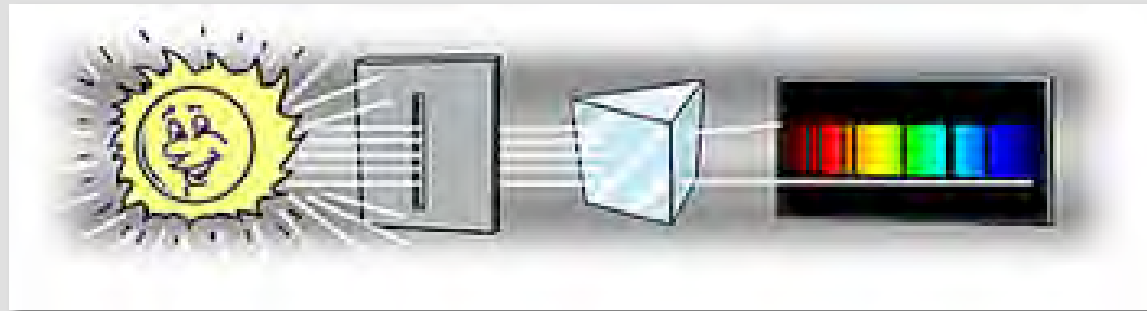
En 1802 William Wollaston découvre qu'il y a des couleurs manquantes dans le spectre du soleil, appelées *raies d'absorption*, mais c'est **Joseph Fraunhofer** qui plus tard observe, décrit et dessine le spectre du Soleil :



Fraunhofer constate qu'une raie d'absorption jaune double correspond exactement à celle observée dans le spectre d'une flamme (c'est le Sodium). Il décrit ensuite 350 autres raies, dont bon nombre sont dues au Fer.

La pureté d'un spectre

Pour séparer les différentes couleurs de la lumière on utilise un appareil qu'on appelle **spectrographe**, dont voici un schéma simplifié :



Dans un spectrographe, on dispose en entrée une **fente** très étroite pour que la pureté du spectre soit la meilleure, afin que l'on puisse bien séparer les différentes couleurs.

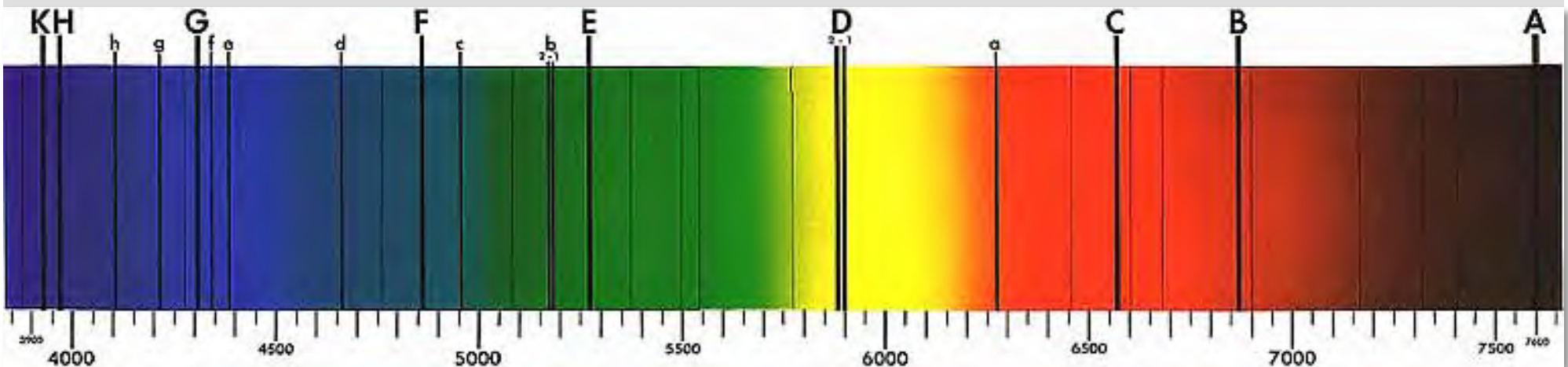
Les raies d'absorption, qui sont *des images monochromatiques de la fente* d'entrée, sont alors les plus nettes possibles.

Un spectrographe moderne permet de distinguer plus de 30 millions de couleurs.

Les raies de Fraunhofer

Les principales raies, découvertes et dessinées par Joseph Fraunhofer en 1814, sont indiquées ci-dessous (entre autres, les raies *D* sont dues au Sodium, les raies *H* et *K* au Calcium, les raies *C*, *F*, *f* et *h* sont dues à l'Hydrogène).

Les différentes couleurs sont désignées par la **longueur d'onde** de la lumière correspondante, qui est très petite (plus d'un million de longueurs d'onde par millimètre). La lumière bleue a une longueur d'onde plus petite que celle de la lumière rouge.

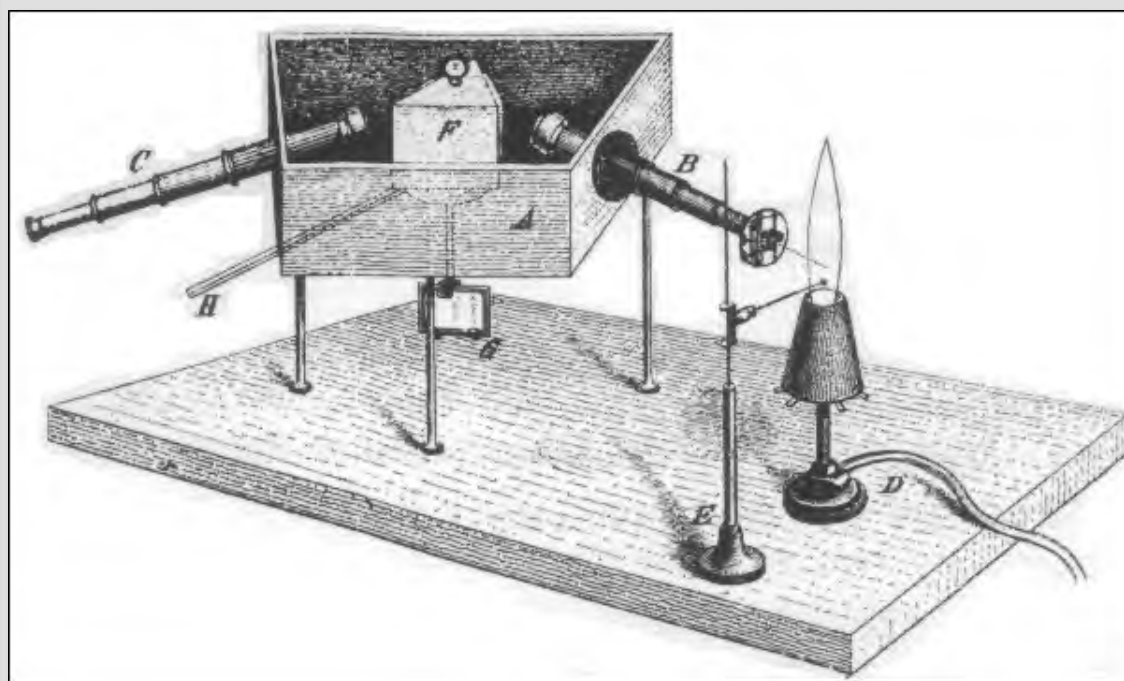


Longueur d'onde (en dixièmes de nanomètre)

Un spectrographe de 1859



En 1859, **Gustav Kirchhoff** (à gauche) étudie les raies d'émission produites par certaines substances introduites dans la flame du bruleur inventé par **Robert Bunsen** (à droite).



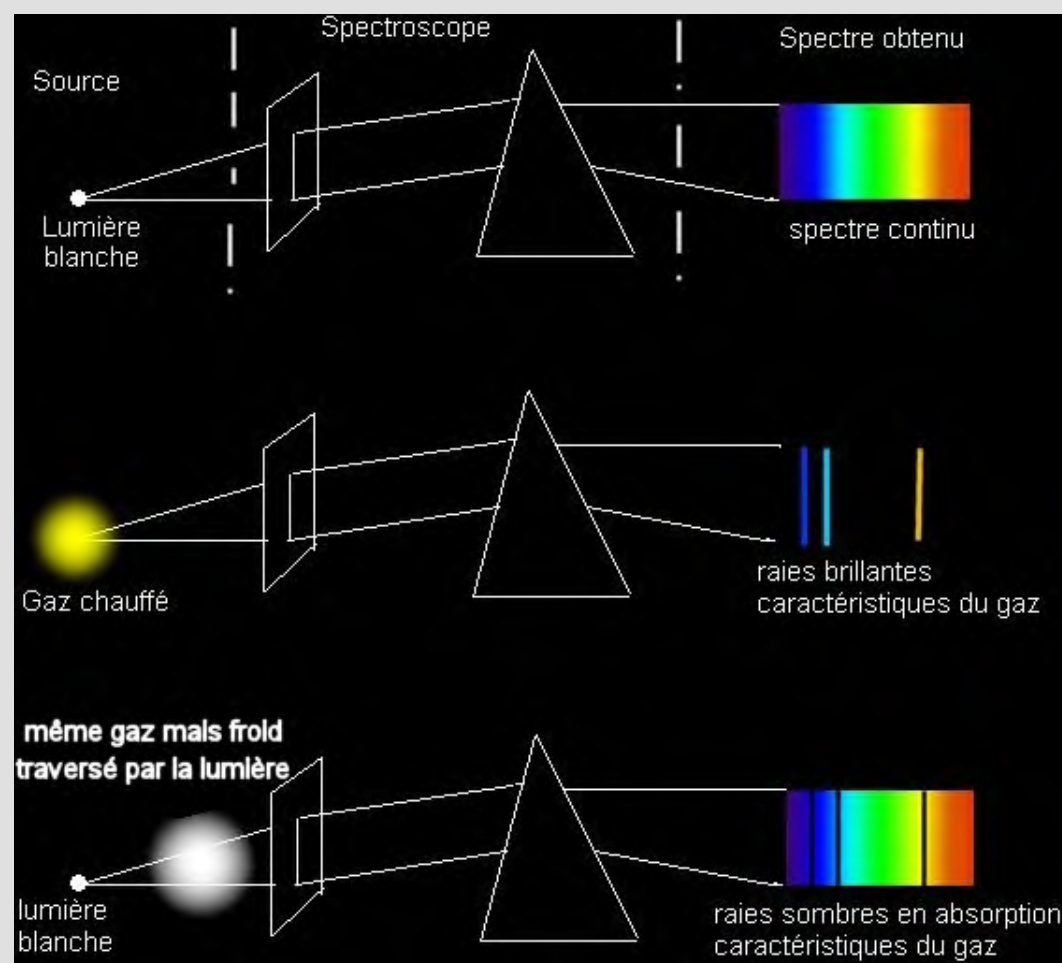
Les lois du rayonnement de Kirchhoff

Kirchhoff constate que chaque substance introduite dans la flamme produit un ensemble de raies qui lui sont propres. C'est le début de l'analyse chimique par la spectroscopie !

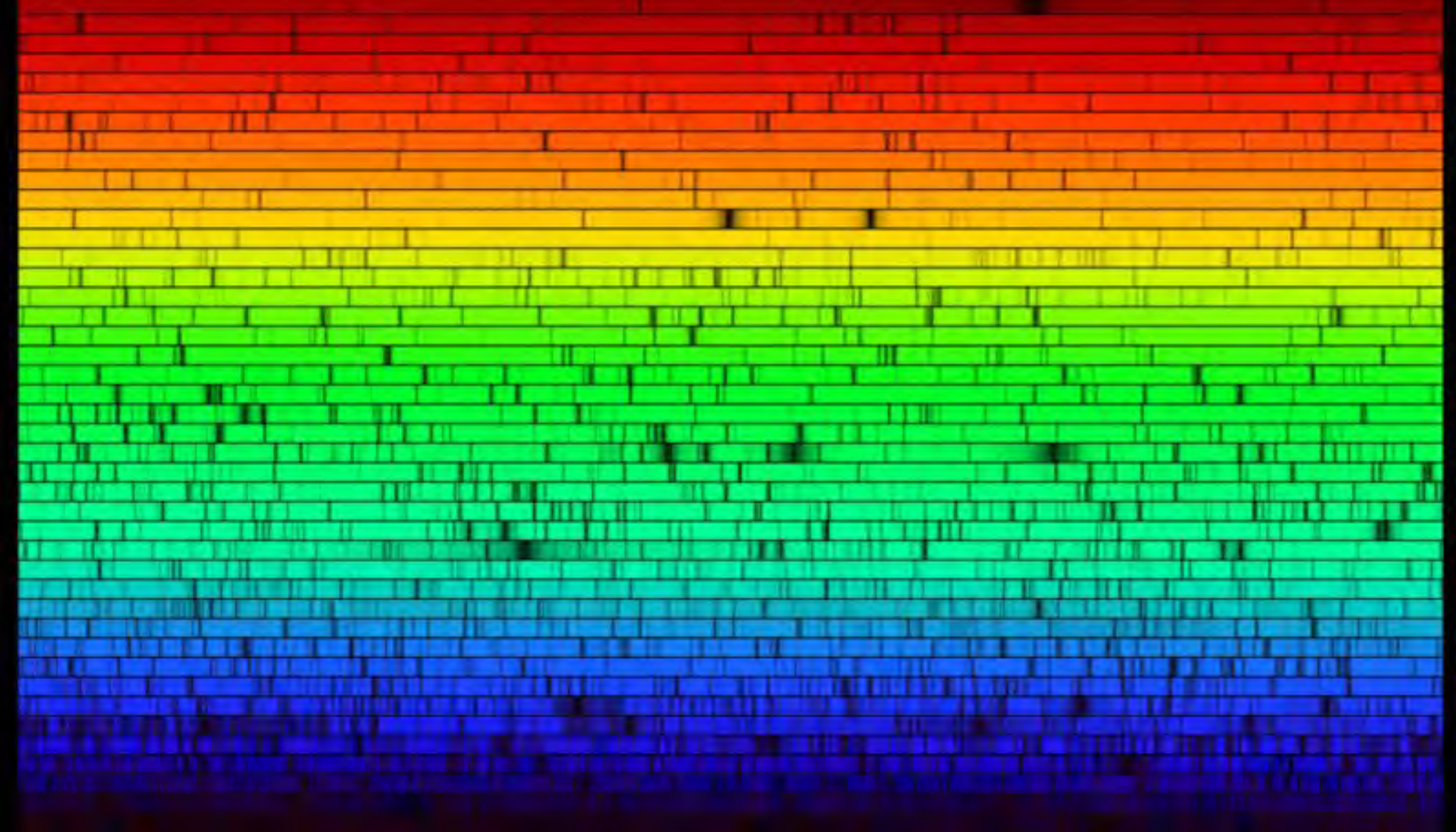
1. Un corps solide, liquide ou gazeux, soumis à haute pression, émet un spectre continu.

2. Un gaz chaud à basse pression produit un spectre en émission, caractéristique du gaz.

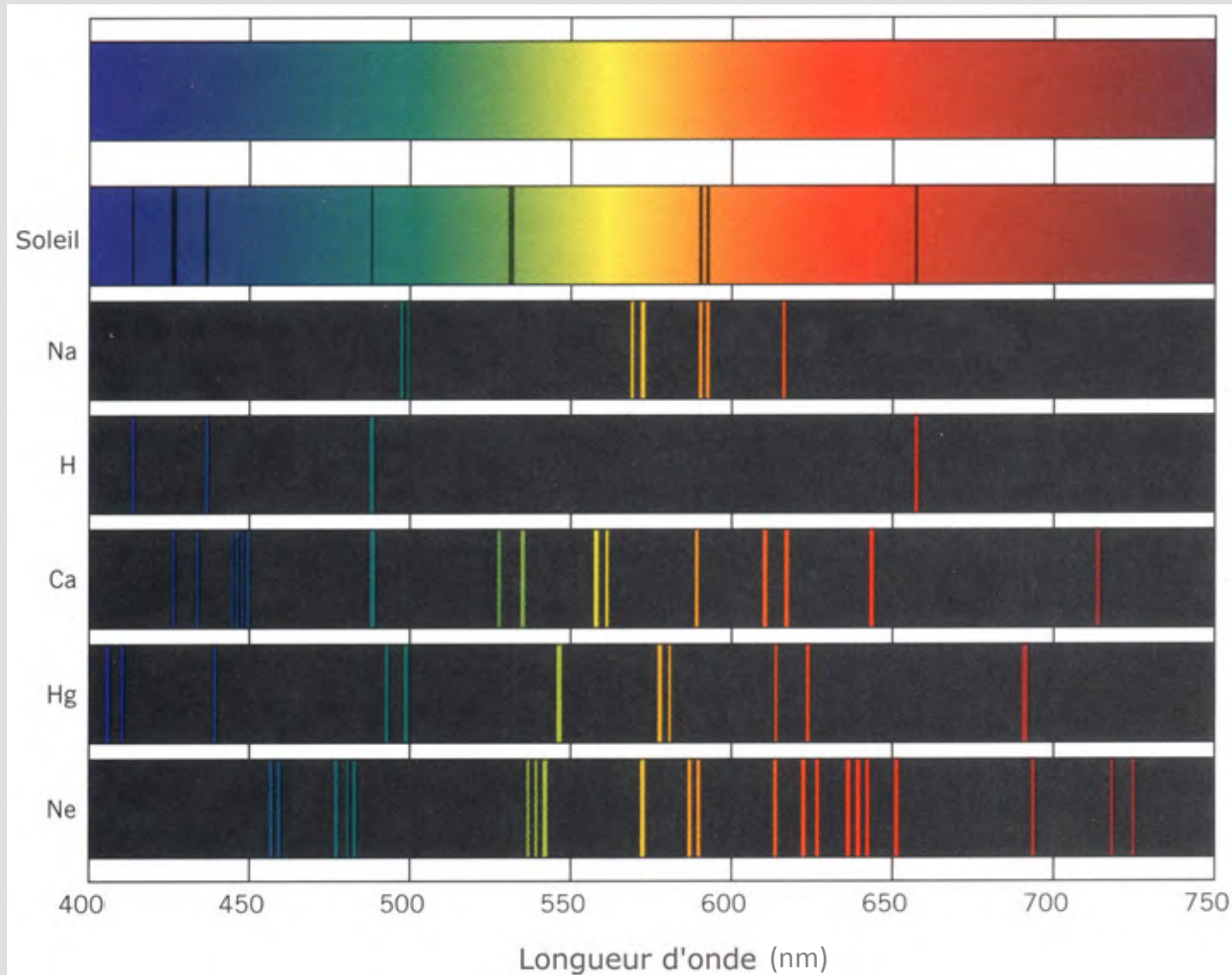
3. Vu devant une source à spectre continu, le même gaz sous pression, mais froid, produit les mêmes raies, mais en absorption.



Spectre détaillé du Soleil



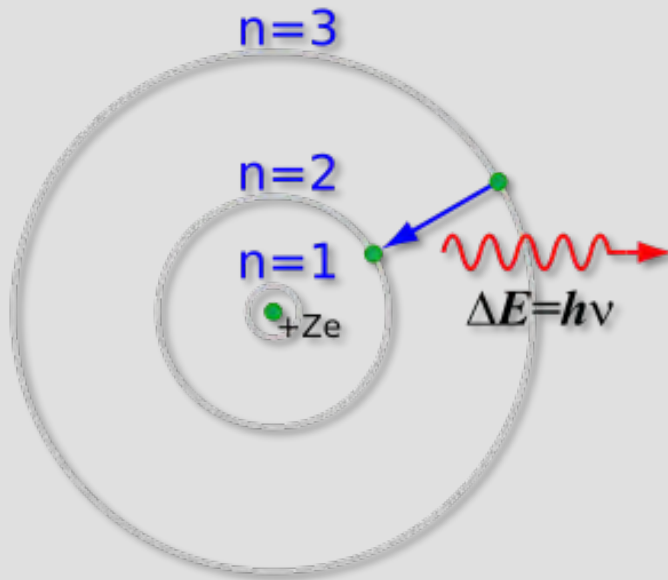
Pourquoi ces raies discrètes ?



La nature discrète de la lumière d'un gaz, sous forme de photons à certaines longueurs d'onde, est la conséquence *directe* de sa **structure atomique**.

Chaque élément chimique émet (ou absorbe) *seulement* des photons dont les énergies lui sont *caractéristiques* (en quelque sorte son empreinte digitale ou code barre !).

La structure atomique



C'est **Niels Bohr** qui a développé en 1913 la théorie de la structure atomique en suivant les premiers travaux d'Ernest Rutherford.



Dans un atome on peut imaginer que les électrons sont en orbite autour du noyau. A chaque orbite correspond une énergie différente.

Seules certaines orbites sont permises: c'est la **quantification**. Les électrons ayant le plus d'énergie sont sur les orbites les plus hautes (lointaines du noyau).

Si un électron passe d'une orbite haute à une orbite basse, il y a *émission d'un photon* dont l'énergie est la différence d'énergie entre les deux orbites.

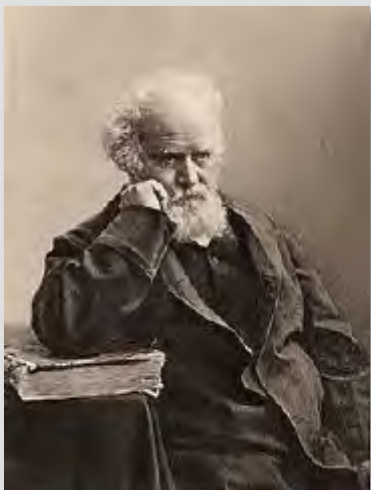
Si un électron fait la transition inverse, il y a *absorption d'un photon* de la même énergie.

Les éléments dans l'Univers

- Il y a 118 éléments chimiques différents connus, dont 94 existent à l'état naturel sur Terre.
- L'*hydrogène* et presque tout l'*hélium* ont existé dès le début de l'Univers (créés au Big Bang), mais **tous les autres éléments naturels ont été fabriqués à l'intérieur de plusieurs générations d'étoiles** par des *réactions de fusion nucléaire*.
- Dans ce sens nous sommes donc tous "poussière d'étoile".
- Les astronomes ont constaté que les abondances relatives des éléments chimiques naturels sont à peu près les mêmes partout dans l'Univers (mais il y a des différences).

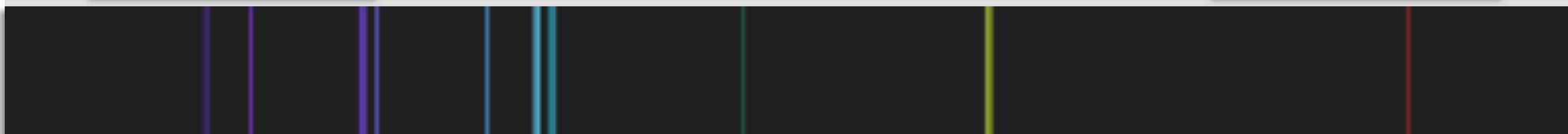
Élément Chimique	Fraction par masse
Hydrogène	73,9 %
Hélium	24,0 %
Oxygène	10,7 %
Carbone	4,60 %
Néon	1,34 %
Fer	1,09 %
Azote	0,95 %
Silicium	0,65 %
Magnesium	0,58 %
Soufre	0,44 %
Tous autres	0,65 %

La découverte de l'hélium

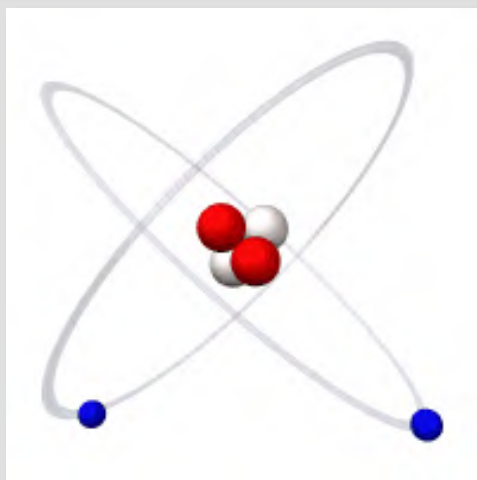


Jules Janssen, lors de l'éclipse de Soleil du 18 août 1868, découvre une mystérieuse raie d'émission jaune, proche des raies D du Sodium.

Cette raie sera analysée par **Norman Lockyer** et attribuée à un élément alors inconnu sur Terre, qu'il nommera *hélium* (d'après le grec *Hélios*).



587.6 nm

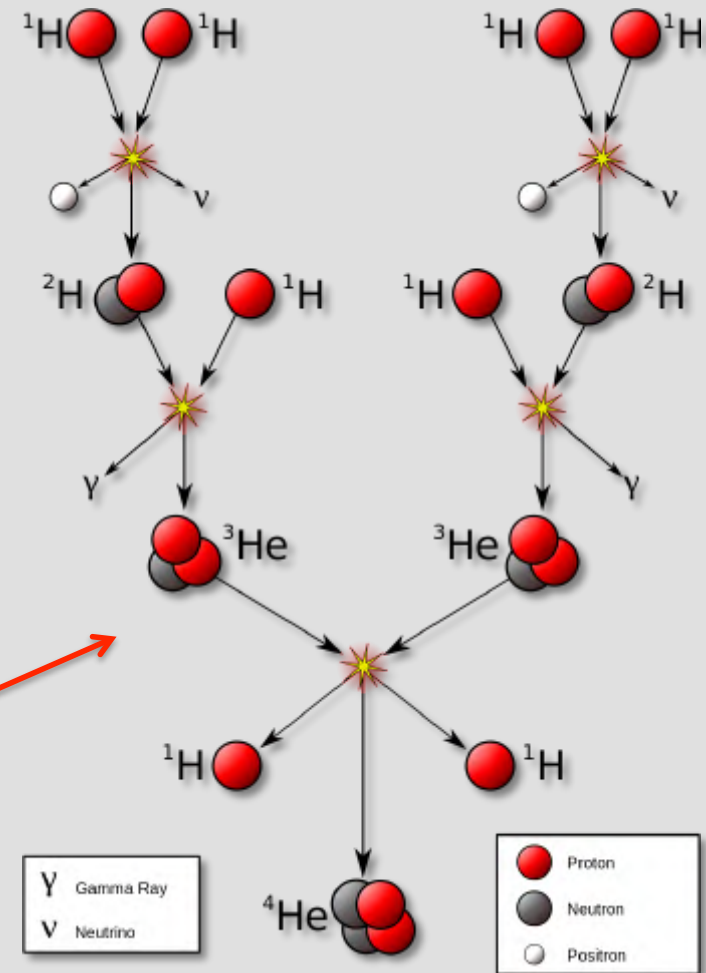


La présence sur Terre de l'hélium sera détectée en 1895 par William Ramsay en étudiant la *clévéite*, minéral d'uranium.

Gaz noble, pratiquement inerte, l'hélium est produit sur Terre par la radioactivité naturelle : une particule *alpha* c'est de l'hélium ionisé (sans électrons).

La source d'énergie du Soleil

- Une étoile comme notre Soleil est une gigantesque boule de gaz (100 fois la taille de la Terre).
- Le coeur, porté à 15 millions de degrés par le poids de l'étoile elle-même, dont la densité est 153 fois celle de l'eau, est le site de **réactions de fusion de l'hydrogène**.
- La pression au centre vaut *230 milliards* de fois la pression atmosphérique sur Terre, ce qui l'empêche de s'effondrer sur lui-même.
- *Dans le Soleil, quatre noyaux d'hydrogène produisent un noyau d'hélium, 2 positrons, 2 neutrinos et 2 rayons gamma.*
- Ces rayons gamma (photons très énergétiques) vont diffuser très lentement vers l'extérieur.

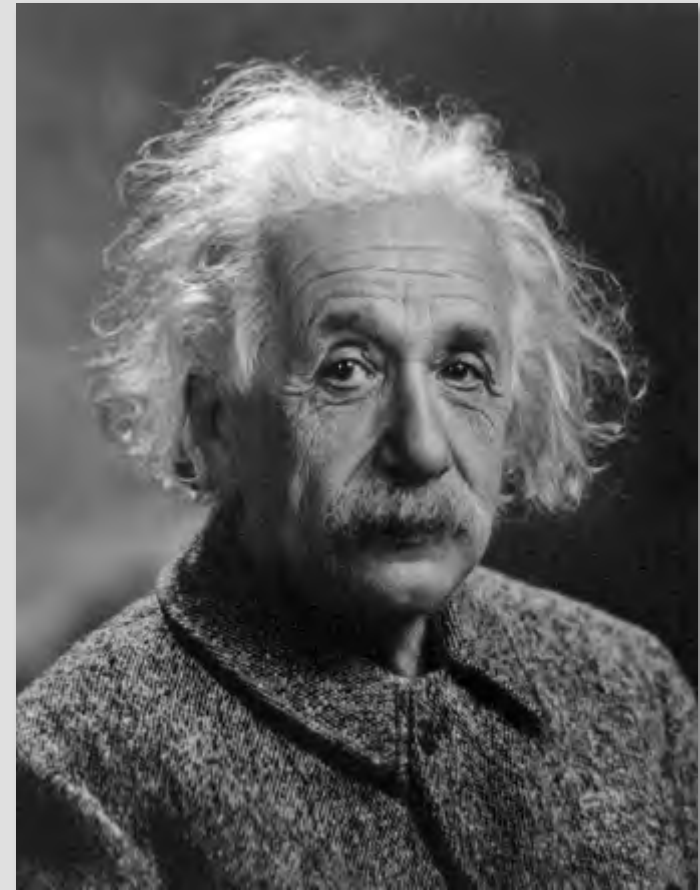


La matière c'est de l'énergie

- Le Soleil consomme 620 millions de tonnes d'hydrogène par seconde pour produire de l'hélium.
- Lors de cette fusion **0,7% de la masse est transformée en énergie** :

$$E = m c^2 \quad (\text{Einstein 1905})$$

- La puissance générée par la fusion est de 276 Watt par mètre cube, comparable à celle produite au centre du bac de compostage actif qui est dans votre jardin !
- Mais c'est le grand volume du Soleil (1,3 millions de fois celui de la Terre) qui explique l'énorme quantité d'énergie libérée par seconde et sa grande longévité.



Albert Einstein

La vie des étoiles

C'est en 1920 qu'**Arthur Eddington** eut l'idée que l'énergie rayonnée par les étoiles provenait de réactions nucléaires.

Jusque là on pensait, comme Lord Kelvin et James Jeans, que l'énergie provenait de la contraction de l'étoile sur elle-même, ce qui limitait la durée de vie d'une étoile à quelques *millions* d'années.

Ceci a permis alors de concilier l'âge du Soleil avec les âges déduites de l'analyse radiométrique de minerai d'uranium, d'au moins un *milliard* d'années.

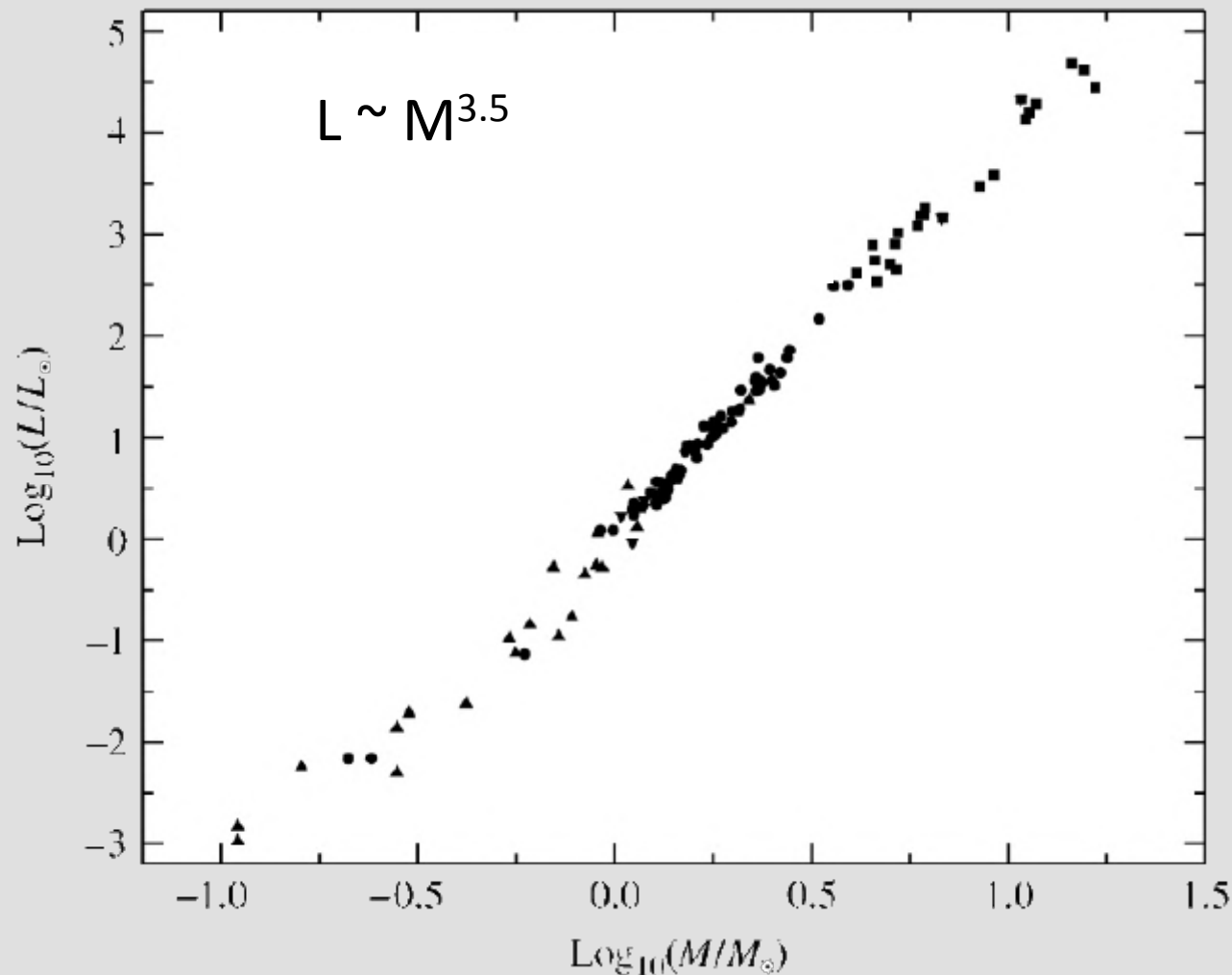
L'âge du Soleil est de 4.6 milliards d'années



Arthur Eddington

La masse est déterminante

Quand elle « brûle » de l'hydrogène, la *luminosité* d'une étoile (quantité d'énergie rayonnée) dépend de sa *masse*. **Eddington** donna en 1924 une explication théorique à cette relation masse-luminosité.

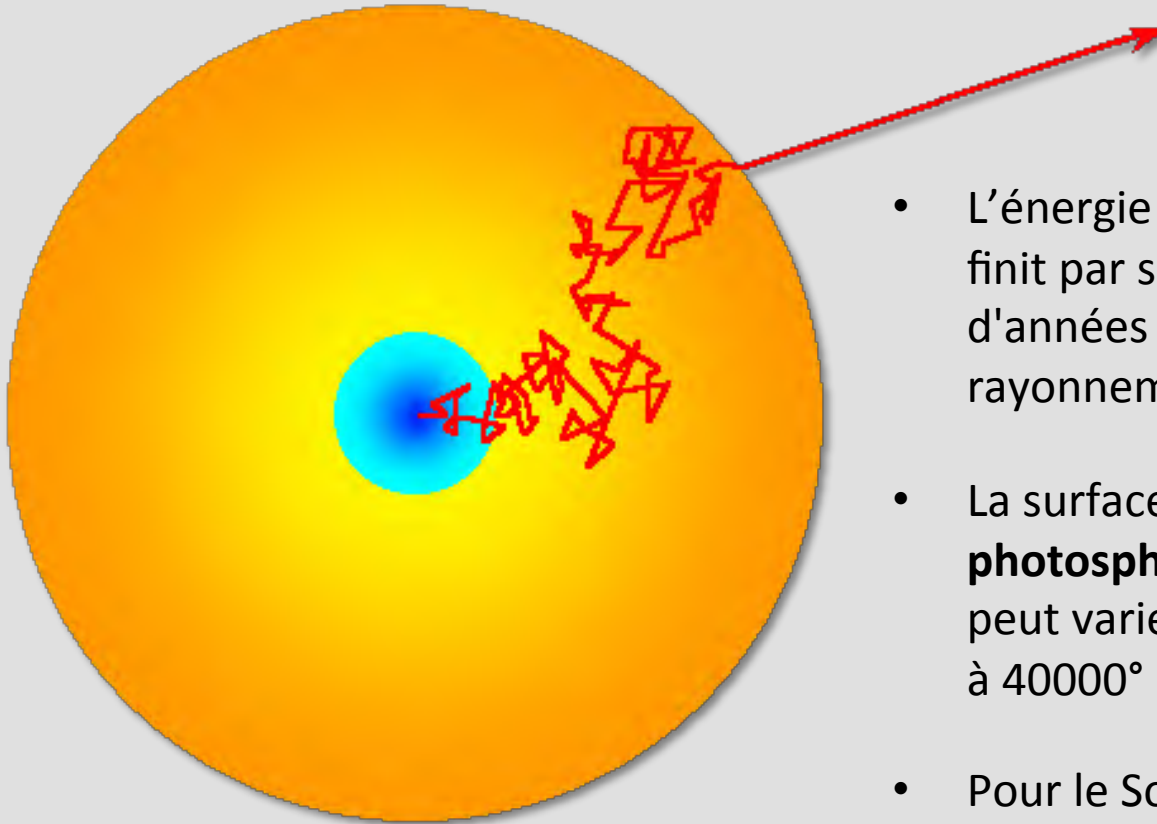


Plus une étoile sera massive, plus sa durée de vie sera courte car plus vite elle épuisera ses ressources d'énergie.

Une étoile avec la moitié de la masse du Soleil sera 10 fois moins lumineuse mais vivra 60 milliards d'années.

Une étoile 10 fois plus massive que le Soleil sera 3200 fois plus lumineuse et ne vivra que 30 millions d'années.

Le long chemin de la lumière



- L'énergie produite au centre de l'étoile finit par sortir (en moins d'un million d'années environ) sous forme de rayonnement visible.
- La surface visible de l'étoile, la **photosphère**, est à une température qui peut varier de 1700° pour les plus froides à 40000° pour les plus chaudes.
- Pour le Soleil c'est 5780° .
- Le spectre émis à la base de la photosphère est celui d'un *corps noir*.

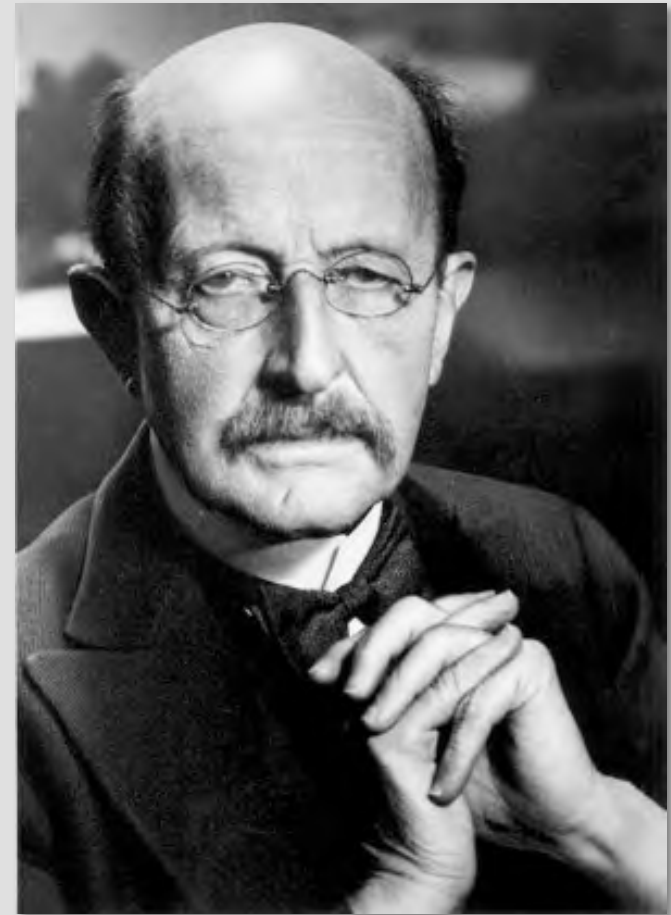
Un corps noir ?

Un corps noir est le corps qui, pour une température quelconque, émet le plus d'énergie.

La physique quantique, fut développée en 1900 par **Max Planck** pour décrire correctement le rayonnement du corps noir.

Pour cela Planck a dû postuler que la matière absorbait ou émettait des ondes électromagnétiques seulement par petits "paquets," appelés *quanta*, caractérisés par leur énergie ou longueur d'onde.

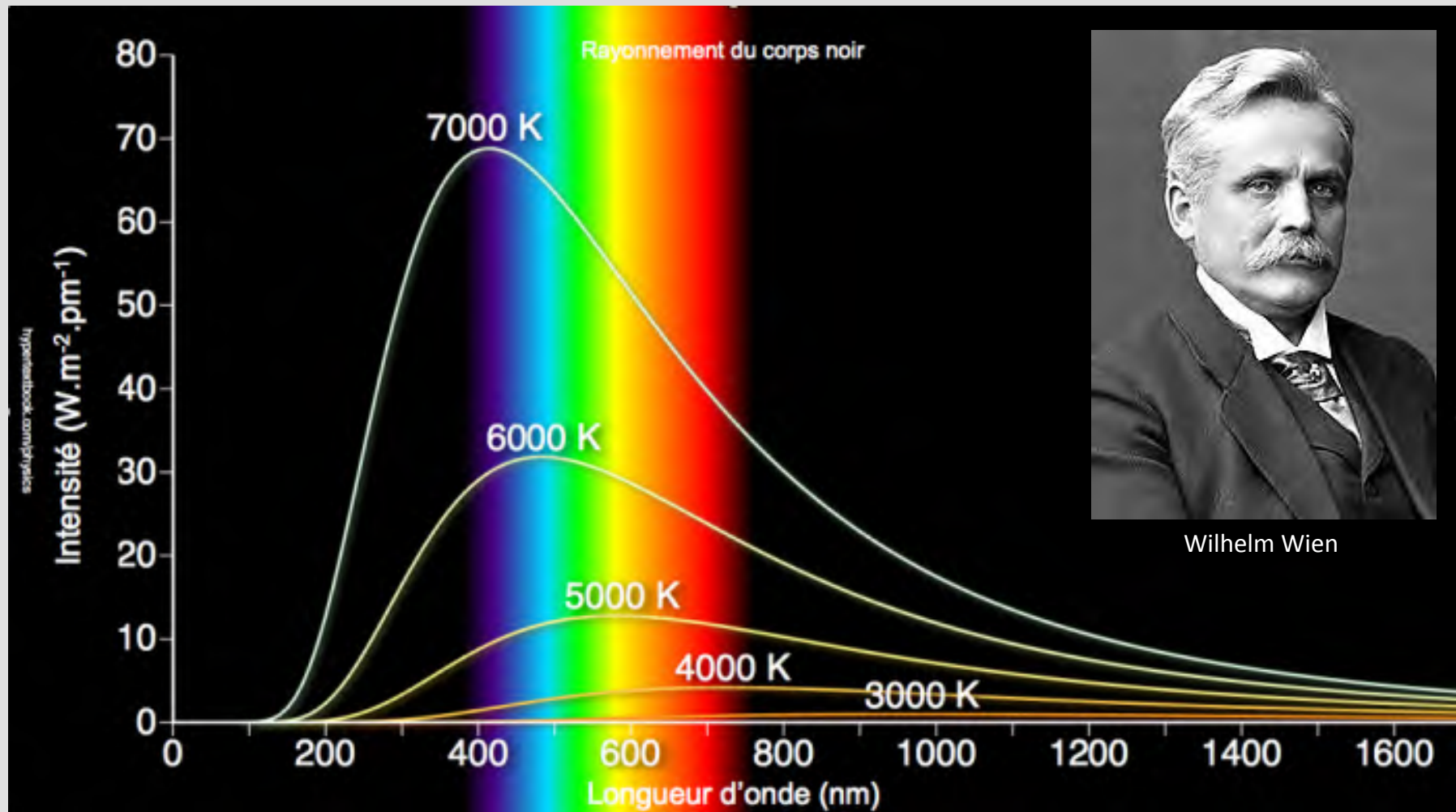
Albert Einstein a démontré à partir de 1905 que ces "paquets" continuaient à se propager et les appella **photons** : c'est la lumière.



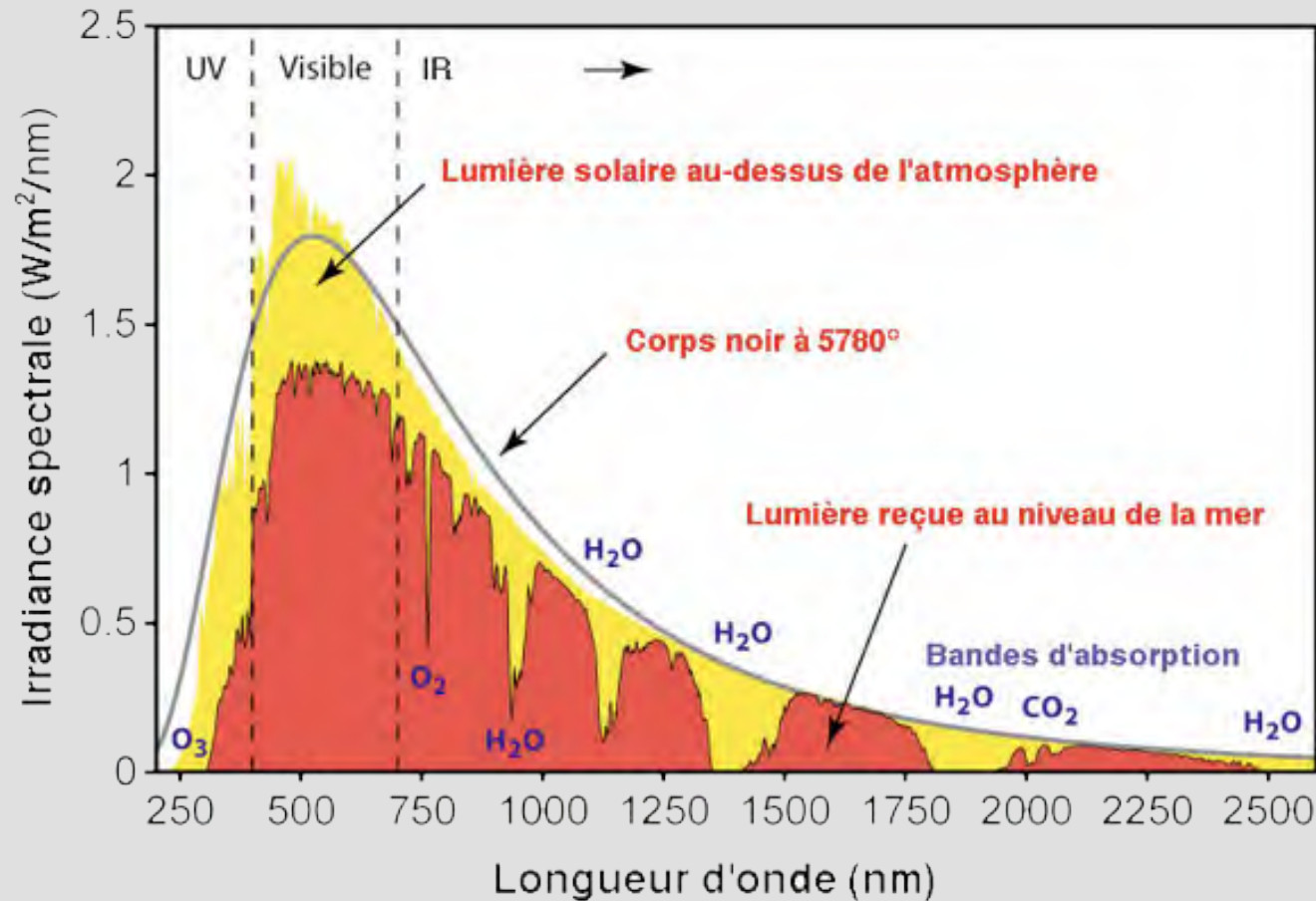
Max Planck

Plus c'est chaud plus c'est bleu

La distribution générale d'énergie des étoiles peut être approximée par celle d'un corps noir. Ce graphique illustre la loi de **Wien** : la longueur d'onde du maximum du rayonnement corps noir diminue quand la température augmente. Les étoiles froides apparaîtront donc plutôt *rouges* et les étoiles chaudes plutôt *bleues*.



La lumière solaire traverse l'atmosphère

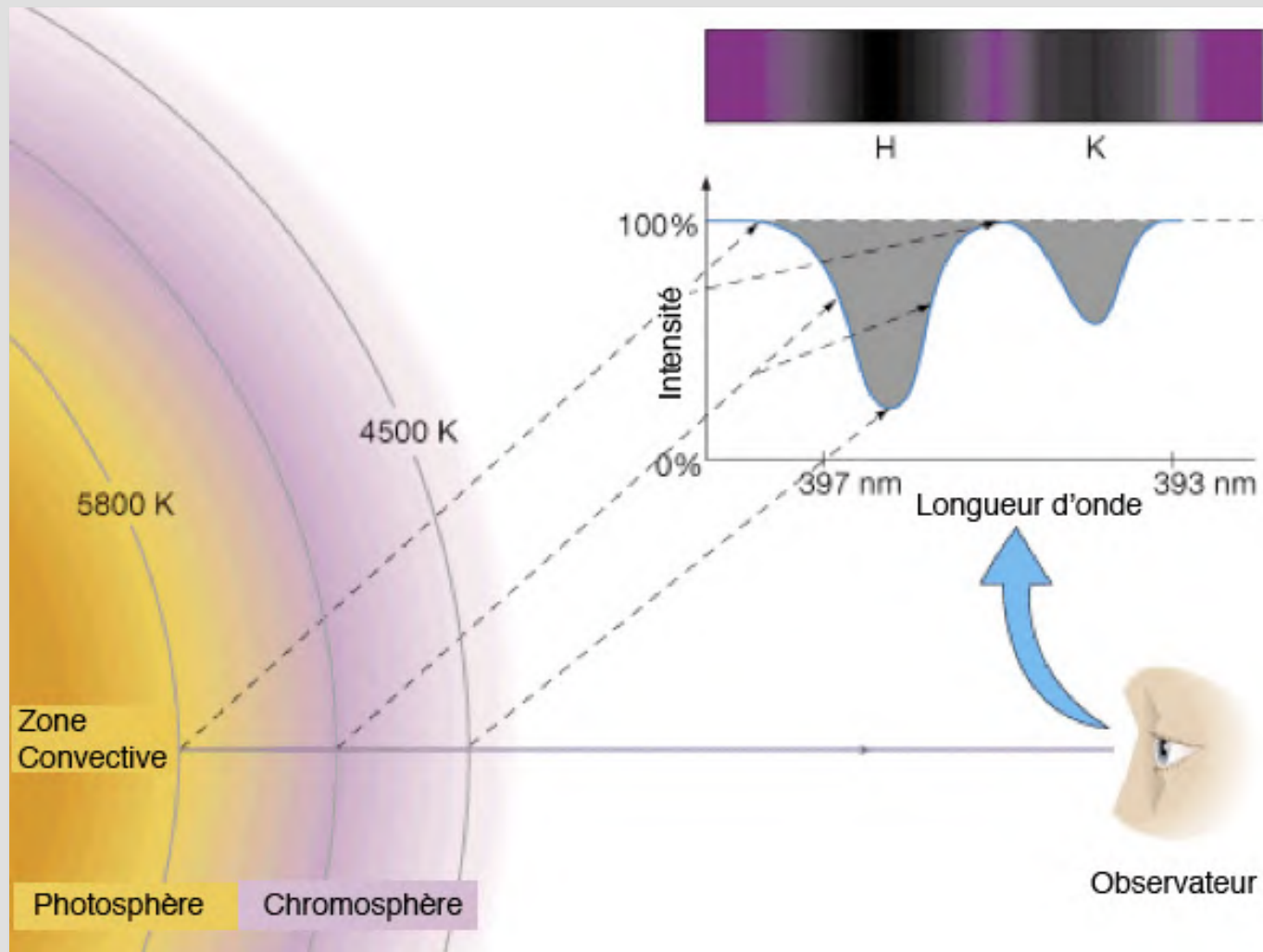


Voici le **spectre solaire** au-dessus de l'atmosphère (en jaune).

La partie qui arrive au niveau de la mer (en rouge), après la traversée de l'atmosphère terrestre, est en partie absorbée par celle-ci, par exemple par de la vapeur d'eau.

On voit ici la courbe d'un **corps noir** ayant la température effective de la photosphère solaire, 5780° (courbe continue noire).

Formation des raies d'absorption

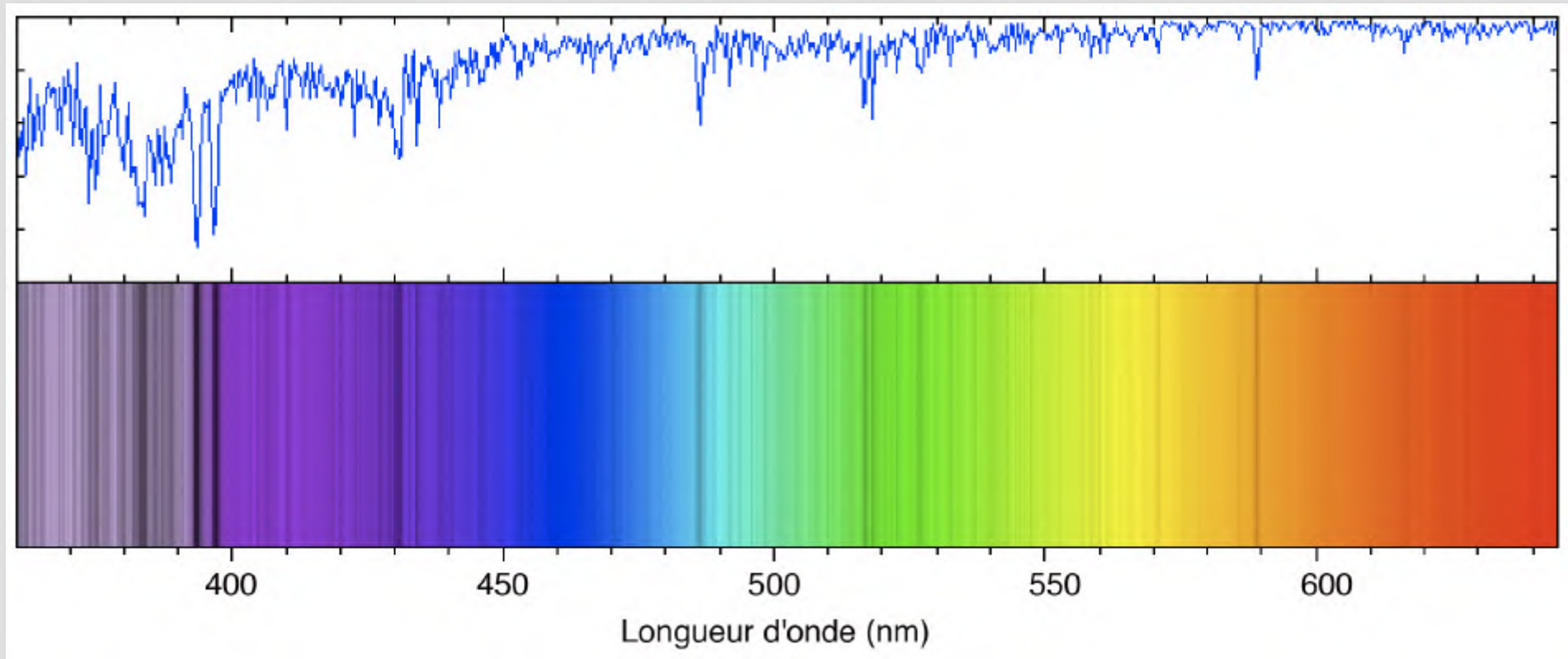


La température décroît rapidement dès que l'on s'éloigne de la base de la **photosphère**.

Les couches les plus externes de l'étoile, son atmosphère, sont plus froides, et absorbent une partie de cette énergie sous la forme de raies d'absorption (Loi de Kirchhoff).

Une **raie d'absorption** a un *profil en forme de cloche renversée*. Les ailes sont produites plus en profondeur et le centre plus en surface.

Comment étudie-t-on un spectre ?



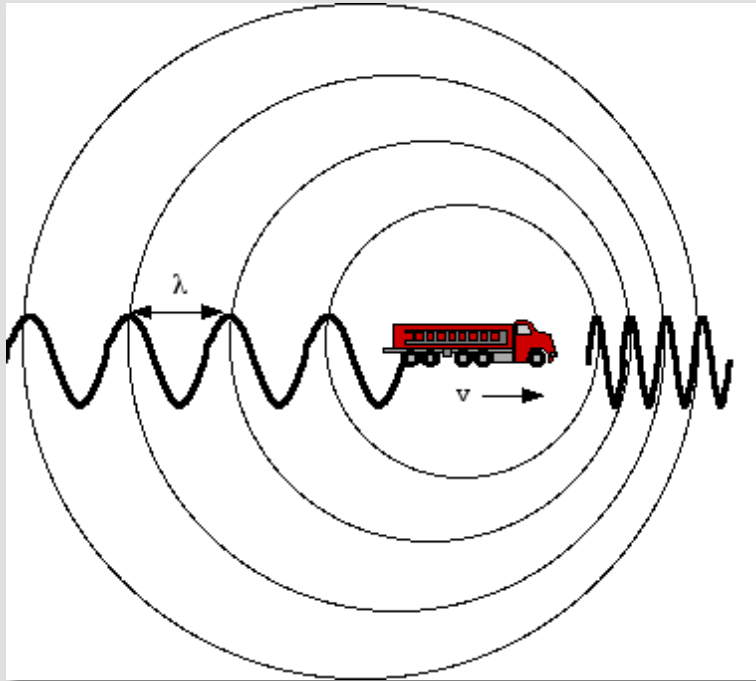
Voici le spectre de la lumière du Soleil montré à la fois comme une image colorée et aussi comme une courbe qui trace l'intensité du spectre en fonction de la longueur d'onde. (On mesure les longueurs d'onde en nanomètres : un nanomètre (*nm*) est un milliardième de mètre). Ces courbes, sous forme de fichiers informatiques, sont utilisées par les astronomes pour analyser en détail la lumière des étoiles.

Que dit cette lumière ?

- L'analyse des raies d'absorption dans le spectre d'une étoile nous renseigne sur l'étoile elle-même et son environnement :
 - sa vitesse relative à nous
 - la taille et la distance de l'étoile
 - la température de sa surface
 - la composition chimique de son atmosphère
 - les mouvements dans son atmosphère
 - sa rotation sur elle-même
 - son champ magnétique
 - la matière interstellaire sur la ligne de visée
- Si l'on arrive à bien comprendre le message codé d'un spectre, son étude permet de presque tout savoir sur une étoile !



La vitesse et l'effet Doppler-Fizeau



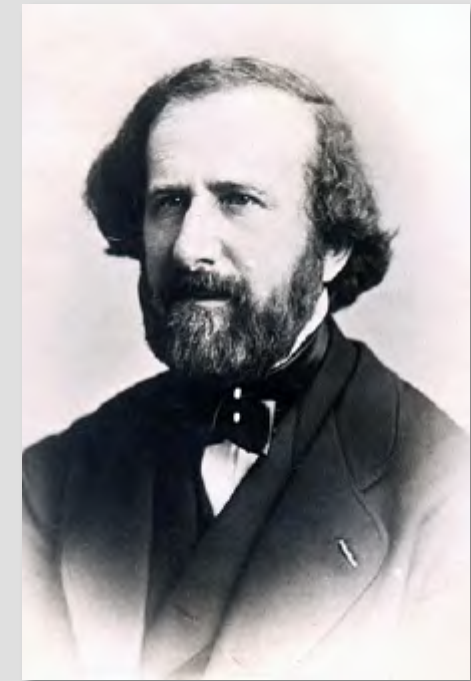
L'intervalle séparant des ondes successives est plus petit dans la direction du mouvement et plus grand dans la direction opposée.

Cet effet fut décrit par **Christian Doppler** (en 1842) et **Hyppolite Fizeau** (en 1848).

Vous entendez l'effet Doppler-Fizeau chaque fois qu'un véhicule pourvu d'une sirène (pompiers, ambulance) passe rapidement près de vous: en s'approchant, le son émis par le véhicule est plus aigu et en s'éloignant le son est plus grave.

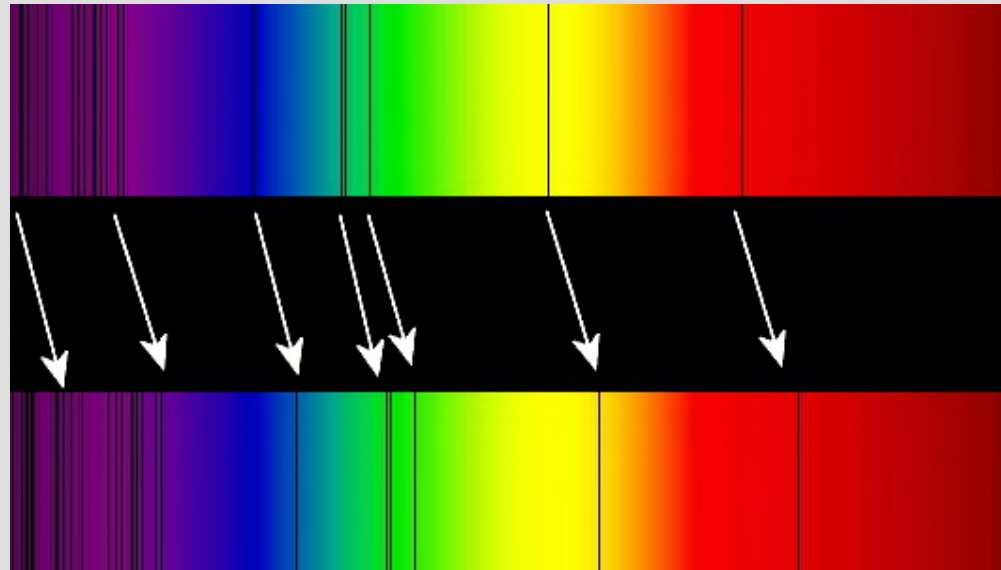


Christian Doppler



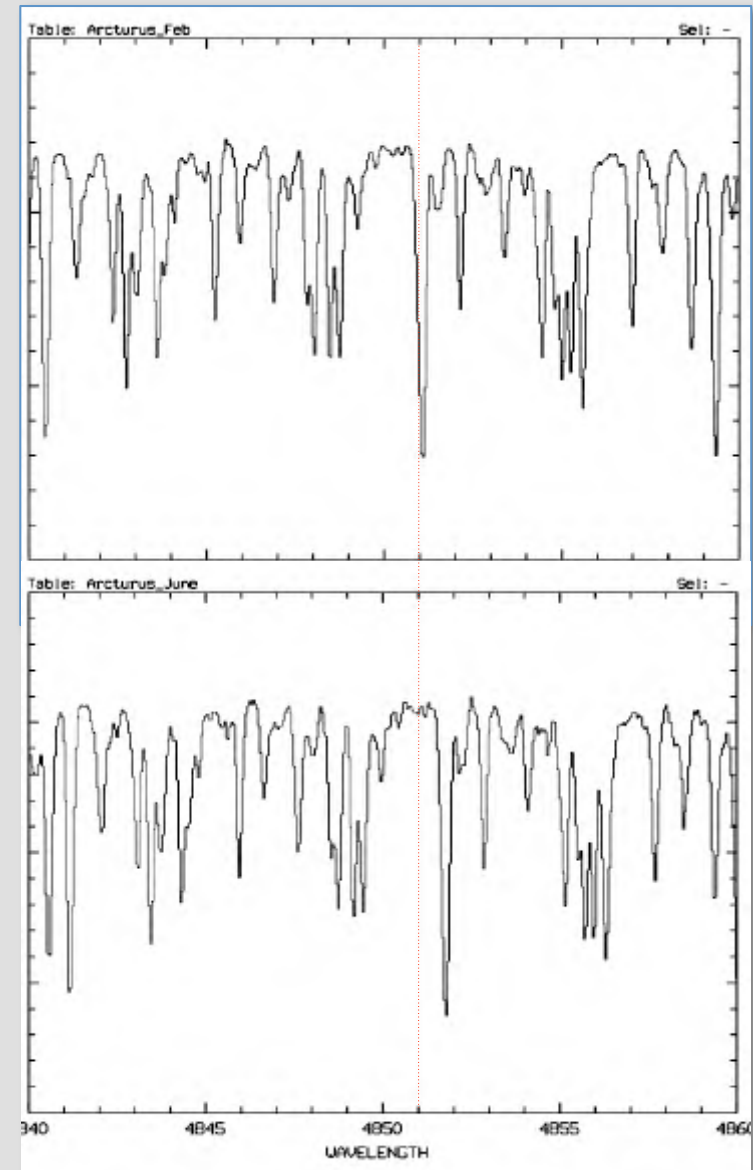
Hyppolite Fizeau

L'effet sur les spectres



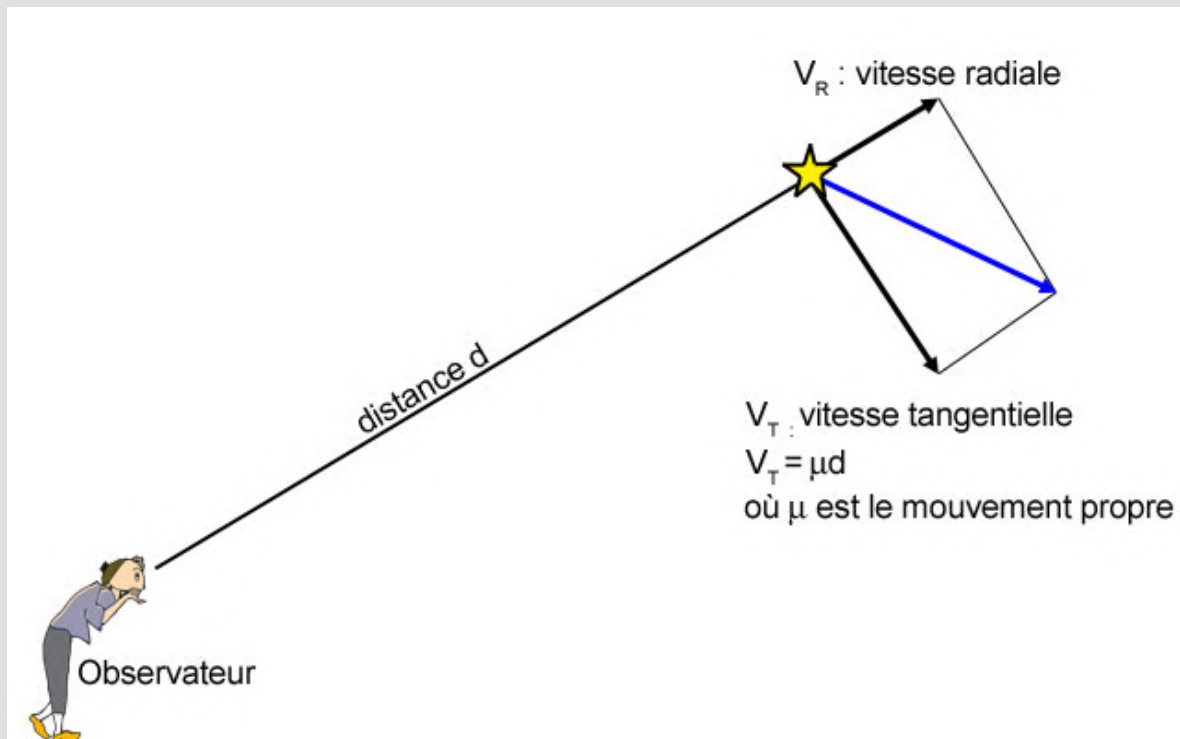
La longueur d'onde d'une raie d'absorption subit un décalage par rapport à sa valeur au repos. Un décalage vers le rouge (ci-dessus) si la source s'éloigne et vers le bleu si elle se rapproche.

A droite, deux spectres de l'étoile *Arcturus* pris en février et en juin à l'OHP avec ELODIE. On voit le décalage des raies introduit par le mouvement de la Terre autour du Soleil ($\Delta\lambda/\lambda = v/c$).



Le mouvement des étoiles

Lorsqu'on mesure la vitesse d'une étoile en spectroscopie, on ne mesure que la composante de sa vitesse projetée dans la ligne de visée, qu'on appelle la **vitesse radiale**. L'autre composante, dans le plan du ciel, la vitesse tangentielle (ou *mouvement propre*) ne peut être mesurée qu'en prenant des images très détaillées du ciel (c'est de *l'astrométrie*, maintenant pratiquée depuis l'espace).



La Terre se déplace à 30 km/s sur son orbite autour du Soleil.

$$1 \text{ km/s} = 3600 \text{ km/h}$$

Le Soleil se déplace à 20 km/s par rapport aux étoiles proches.

La vitesse de rotation des étoiles par rapport au centre de la Galaxie est de 215 km/s au voisinage du Soleil.

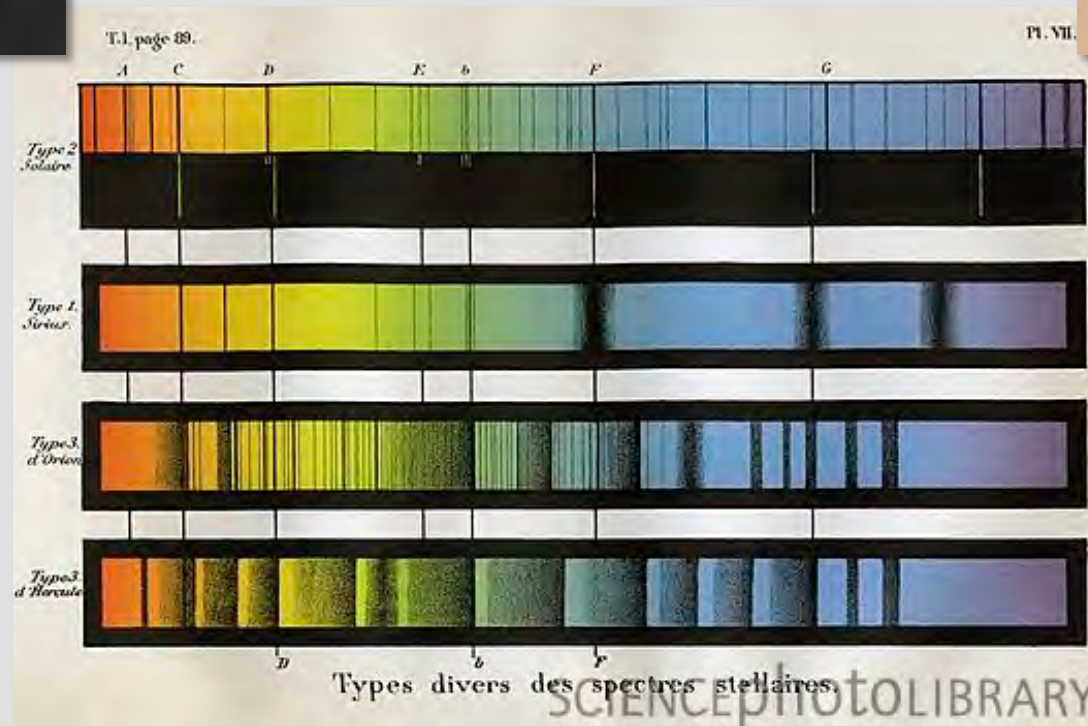
Les étoiles les plus anciennes sont celles qui se déplacent le plus vite dans la Galaxie.

Le record est détenu par une étoile est de 853 km/s.

Les premiers spectres, à l'oeil

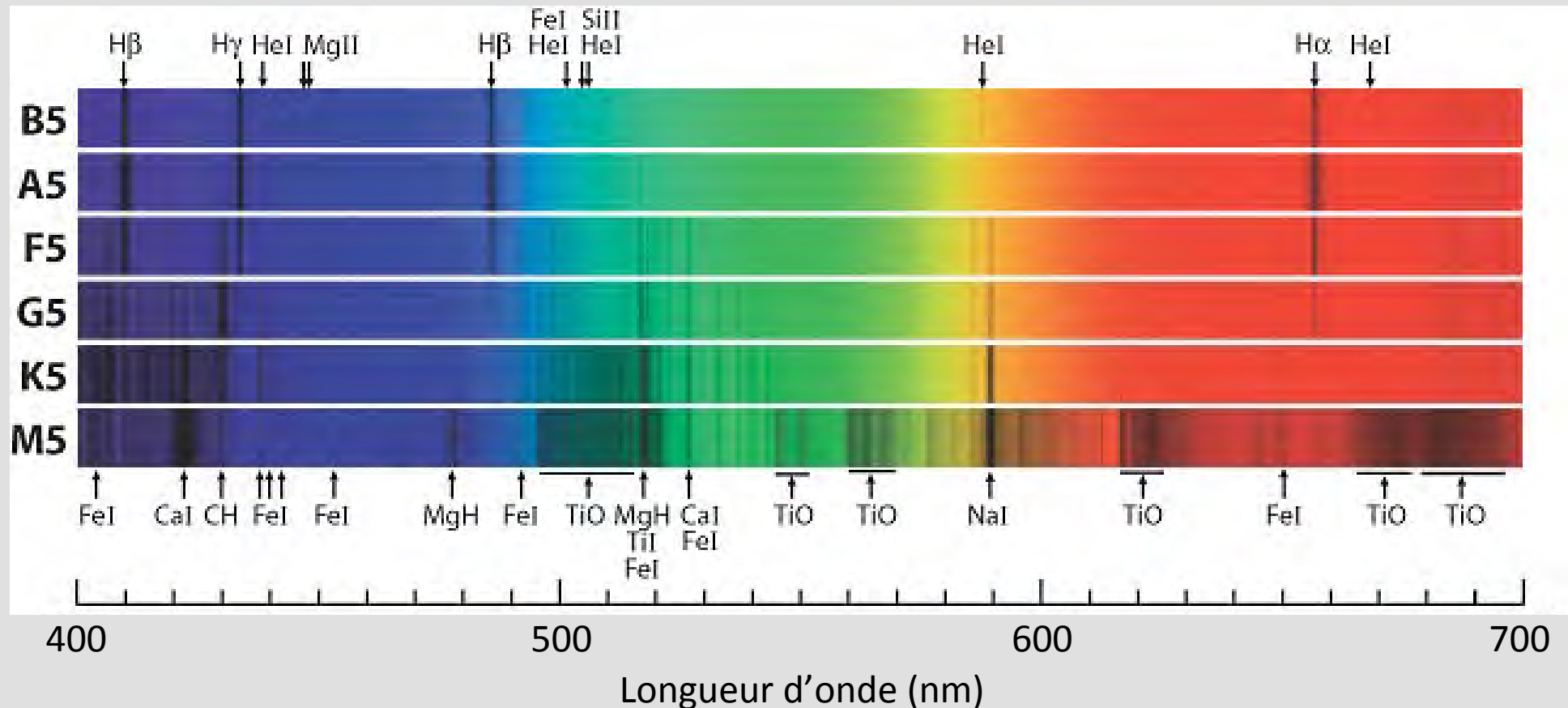


William Huggins et le jésuite **Angelo Secchi** furent les premiers astronomes à étudier en détail le spectre de nombreuses étoiles en les observant *visuellement*, l'un à Londres en 1870 et l'autre à Rome à partir de 1863. Secchi fut le premier à chercher une classification des spectres.



Un séquence de types spectraux

En 1890 l'équipe d'**Edward Pickering** a réalisé la première étude photographique des spectres de beaucoup d'étoiles qui a permis de chercher des familles. Classés d'abord A,B,C,D..., il apparut en 1901 que la séquence O,B,A,F,G,K,M représentait mieux la variation des raies d'absorption d'hydrogène qui *dominent dans le bleu*.



Le harem de Pickering

L'équipe d'**Edward Pickering** à l'Observatoire de Harvard était composé d'une douzaine de femmes employées comme « calculatrices ». Ce sont elles qui ont géré et mesuré les milliers de plaques photo contenant les spectres de toutes les étoiles du ciel plus brillantes que la 10^{ème} magnitude.



Les résultats furent publiés entre 1918 et 1936 sous la forme du Catalogue **Henry Draper**, nom du médecin et astronome amateur ayant financé l'opération.

Les contributions de **Williamina Fleming**, **Annie Jump Canon**, **Antonia Maury** et **Henrietta Swan Leavitt**, véritables scientifiques sous-payées, furent les majeures.

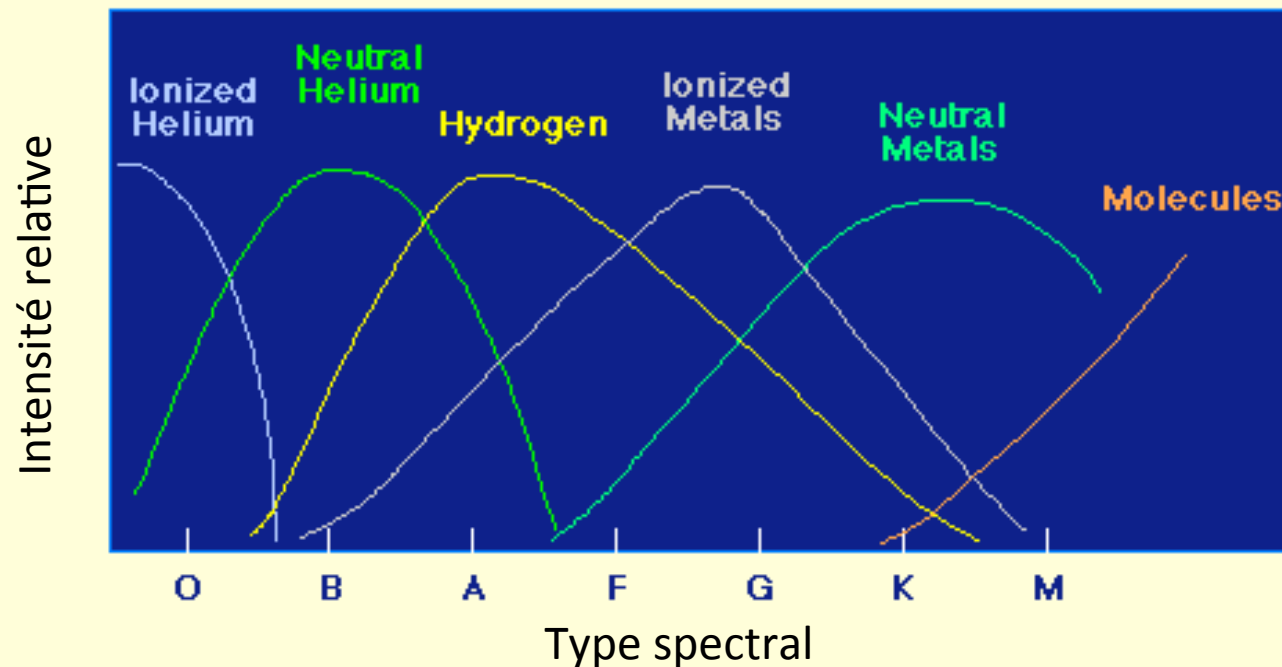
Miss Canon à elle seule a déterminé les types spectraux visuellement pour près de 360 000 étoiles!



C'est une séquence de température

La variation de l'importance des raies d'absorption d'hydrogène fut interprétée en 1924 par **Cecilia Payne** comme étant due à la variation de *l'ionisation* avec la *température* dans les atmosphères des étoiles. Elle fut aussi la première à montrer que le Soleil était essentiellement composé d'hydrogène.

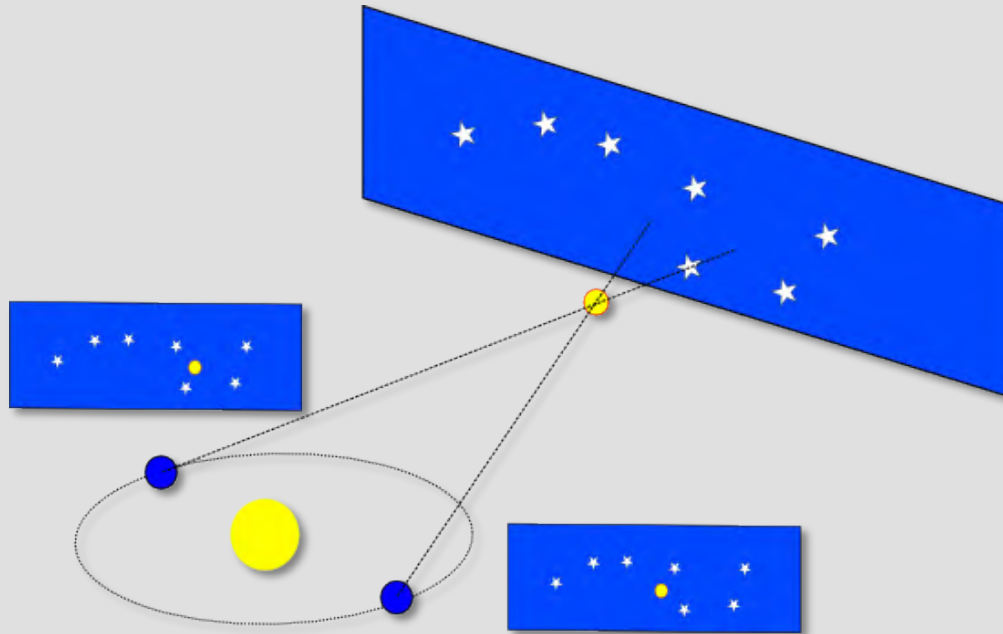
Si la température est trop élevée, l'hydrogène est complètement ionisé. Si elle est trop faible, l'hydrogène devient neutre et même sous forme moléculaire. L'apparition de l'ensemble de raies d'un niveau d'ionisation d'un élément est donc lié à la température.



Les « métaux » ?

Les astronomes désignent sous le vocable « métaux » tous les éléments plus lourds et moins abondants que l'hydrogène et l'hélium.

Les distances aux étoiles



Les distances aux étoiles les plus proches sont obtenues en mesurant leur **parallaxe**, c'est à dire le déplacement apparent par rapport aux astres lointains quand la Terre est à deux points opposés de son orbite. **Friedrich Wilhelm Bessel** en 1838 fut le premier à pouvoir mesurer un tel angle, qui est très petit.



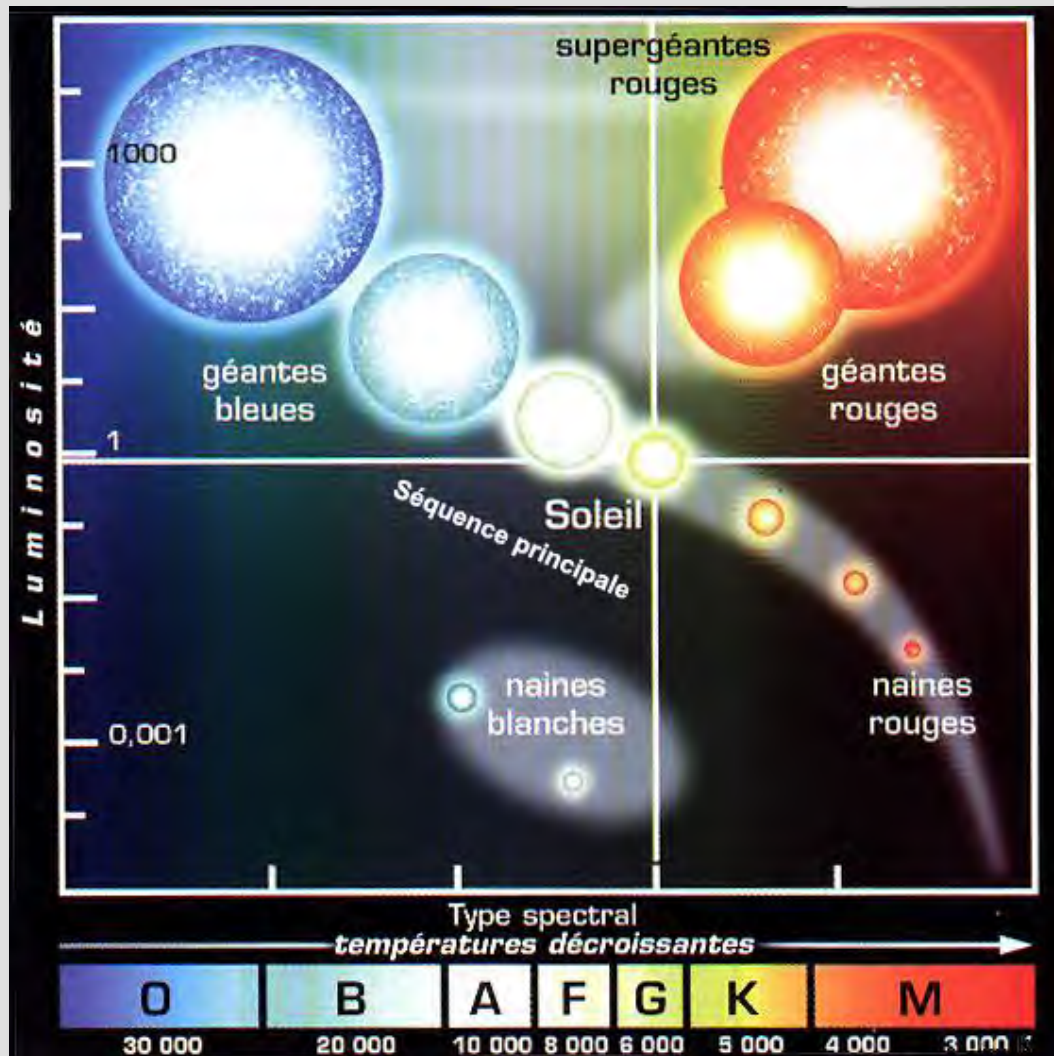
Cependant, cette méthode ne marche pas au delà de 2000 **années-lumière** (a-l).

Les étoiles les plus brillantes visibles à l'œil nu ne sont pas toutes proches de nous : il y en a certaines qui sont effectivement proches (à quelques a-l) mais d'autres sont lointaines (860 a-l).

*Ceci implique que ces étoiles ont des **luminosités intrinsèques** très différentes. Si l'on connaît la luminosité intrinsèque d'une étoile on peut déterminer sa distance.*

Recensement du voisinage solaire

Ce type de diagramme, conçu en 1911-13 par **Ejnar Hertzsprung** et **Henry Russell**, porte la luminosité intrinsèque des étoiles selon leur température de surface.



Les étoiles tirant leur énergie de la fusion de l'hydrogène sont sur la « *séquence principale* ».

Quand cette fusion cessera, par épuisement de l'hydrogène au centre, le Soleil quittera le stade séquence principale pour grandir de taille en baissant sa température de surface : c'est le stade de « *super-géante rouge* ».

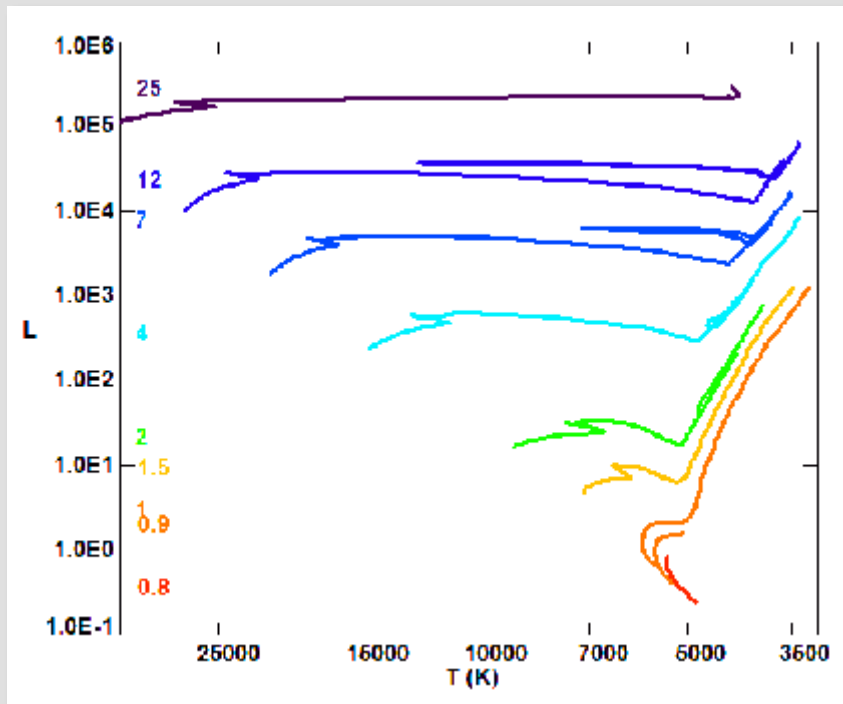
Lorsque les réactions nucléaires suivantes seront éteintes, c'est ensuite la mort comme « *naine blanche* ».

Le chemin des étoiles

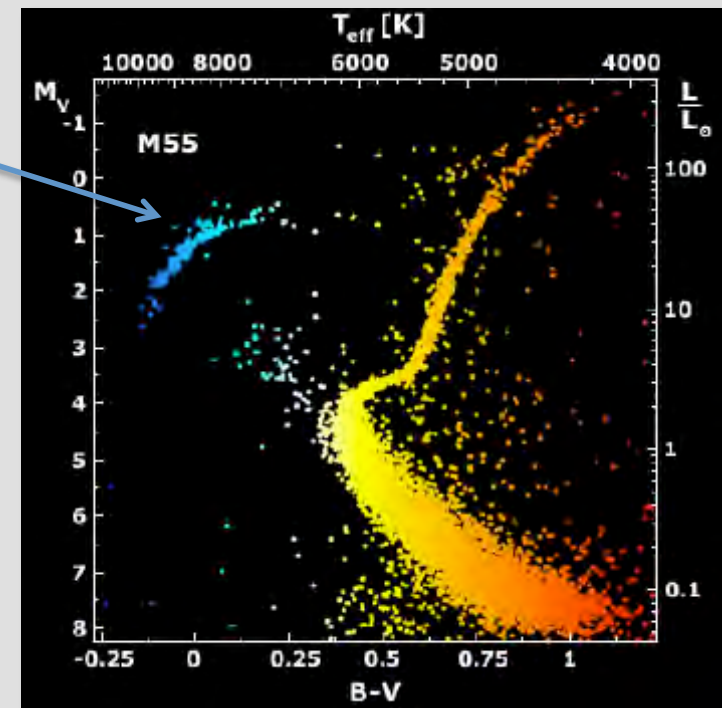
Le chemin suivi par une étoile quand elle quitte la « séquence principale » a été calculé en détail. Il varie selon la masse initiale de l'étoile.

Toutes les étoiles vont passer par le stade de super-géante rouge.

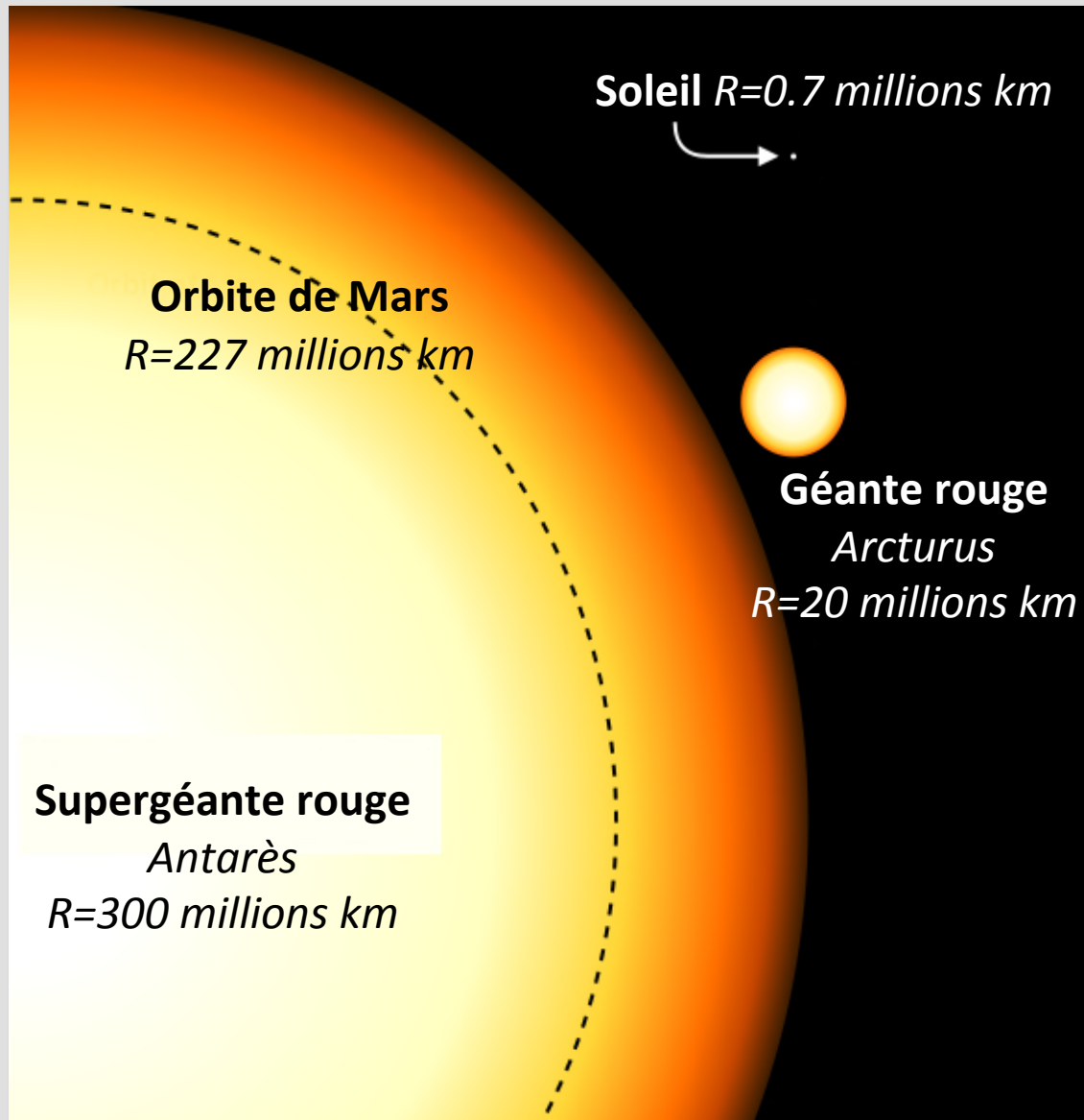
Ce chemin peut être constaté en étudiant un amas stellaire, qui est un groupe d'étoiles nées au même temps. Les plus massives ont évolué le plus vite.



Ces étoiles sont des anciennes géantes rouges



Etoiles naines et supergéantes



Les étoiles super-géantes rouges ont des tailles comparables à celle de l'orbite de Mars.

Cette différence de taille a des conséquences énormes sur les conditions dans les atmosphères de ces étoiles.

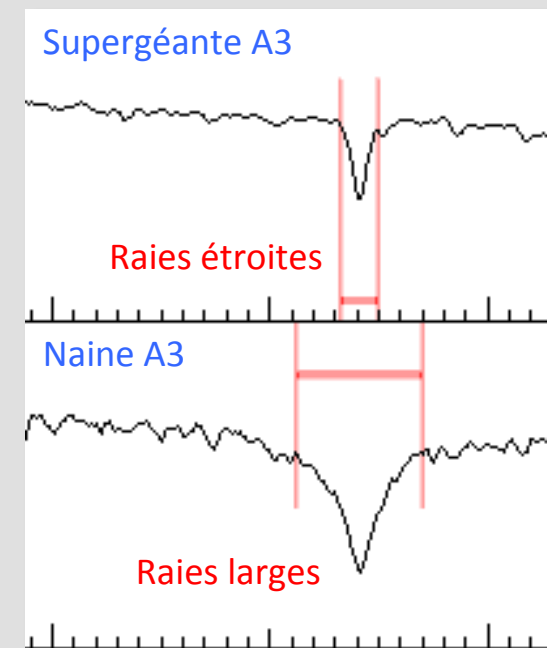
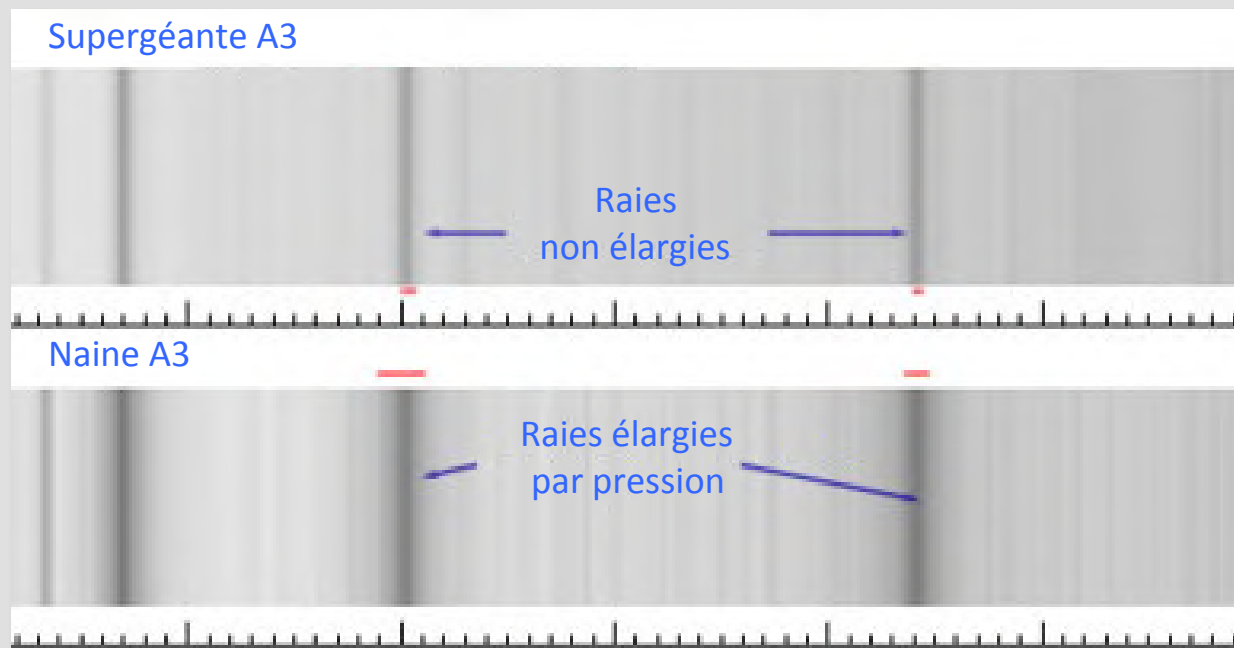
La pression à la surface peut varier d'un facteur 20 000.

Quand la pression augmente les collisions entre les atomes sont beaucoup plus fréquentes. Ceci produit un **élargissement** notable des raies d'absorption.

L'effet de la gravité sur les spectres

L'étude de la largeur des profils des raies d'une étoile permet de déduire la pression atmosphérique qu'y règne et donc d'estimer la taille de l'étoile et par cela sa luminosité intrinsèque.

En comparant la luminosité apparente de l'étoile à la valeur intrinsèque déduite de sa taille on peut ainsi obtenir sa distance. Cette détermination s'appelle « *parallaxe spectroscopique* »



Le destin d'une étoile massive

Les étoiles ayant **plus de 10 fois la masse du Soleil**, après épuisement de l'hydrogène, voient leur cœur se contracter de plus en plus afin d'augmenter la température pour que d'autres réactions nucléaires puissent s'allumer :



- fusion de *Hélium pour faire du Carbone* (à 100 millions de degrés)
- fusion du *Carbone pour faire du Néon, de l'Oxygène et du Magnésium* (à 600 millions)
- fusion de l'*Oxygène pour faire du Silicium, du Phosphore et du Souffre* (à 1500 millions)

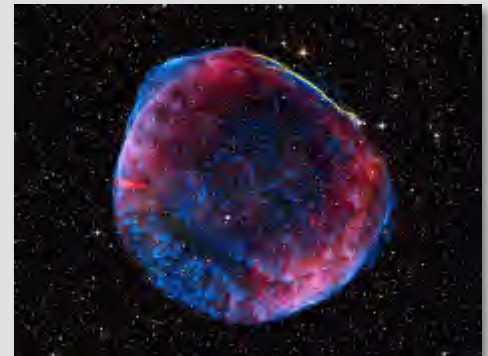
Ensuite, vers 3000 millions de degrés, ce sera la fusion du *Silicium avec de l'Hélium pour faire du Fer*.

C'est la dernière réaction pouvant produire de l'énergie.

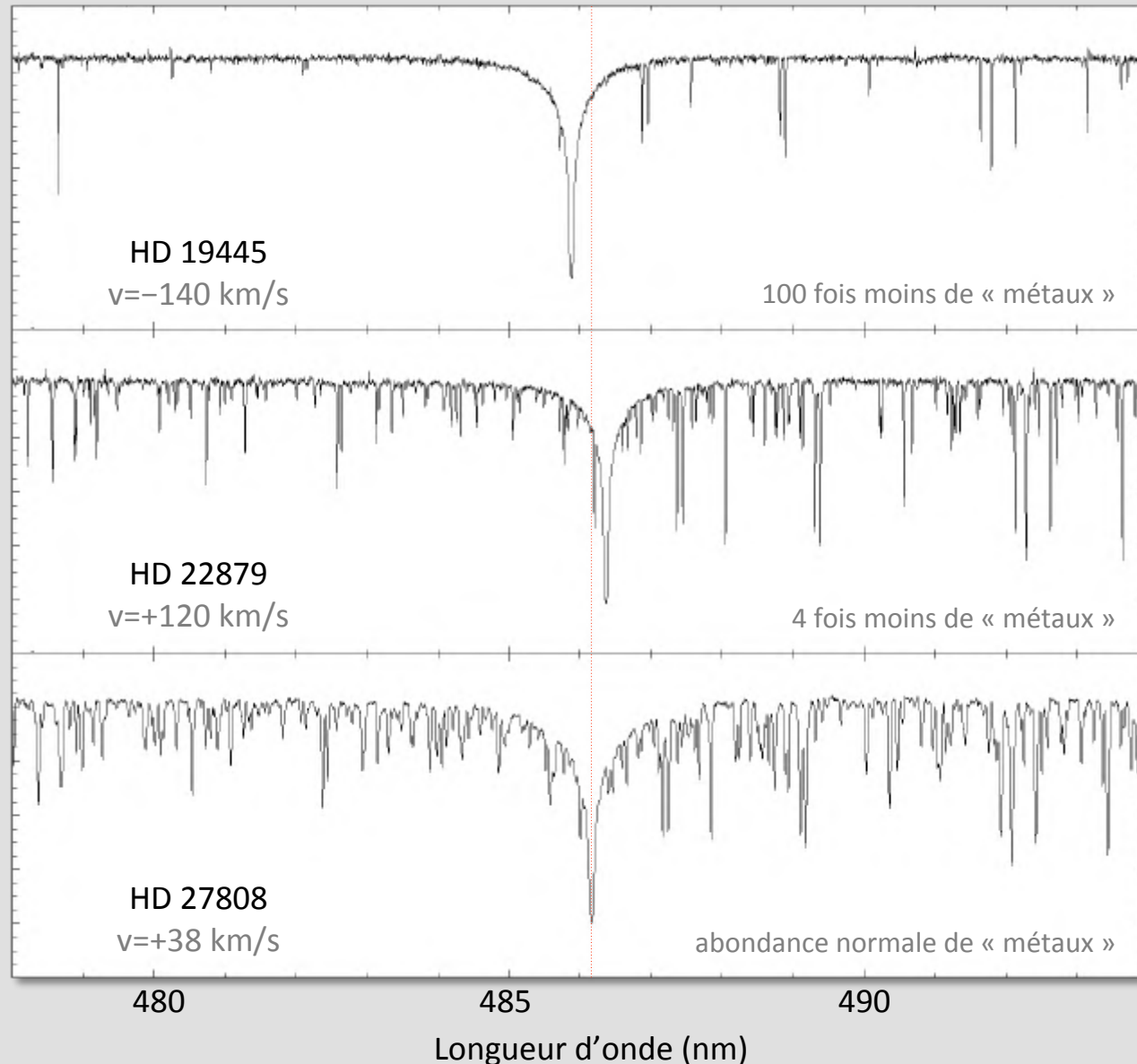
Le cœur de l'étoile à une structure en *pellure d'oignon*. **La fin est proche...**

Le cœur s'effondre sous l'énorme pression et dévient de la matière neutronique et de d'autres réactions, par capture rapide de neutrons, produisent des éléments *plus lourds que le Fer*. L'étoile s'effondre alors très rapidement et explose sous la poussée d'une gigantesque onde de choc : c'est une **Supernova** qui va briller autant qu'une galaxie !

Tous les éléments produits par réactions nucléaires vont alors être dispersés et contribueront à enrichir en « métaux » le milieu interstellaire.



Les « métaux » des étoiles



La composition chimique des atmosphères des étoiles reflète celle du gaz interstellaire qui leur a donné naissance.

Les étoiles les plus anciennes, dites de *Population II*, sont pauvres en « métaux » et se déplacent à grande vitesse.

Voici les spectres obtenus à l'OHP avec ELODIE de trois étoiles bien différentes.

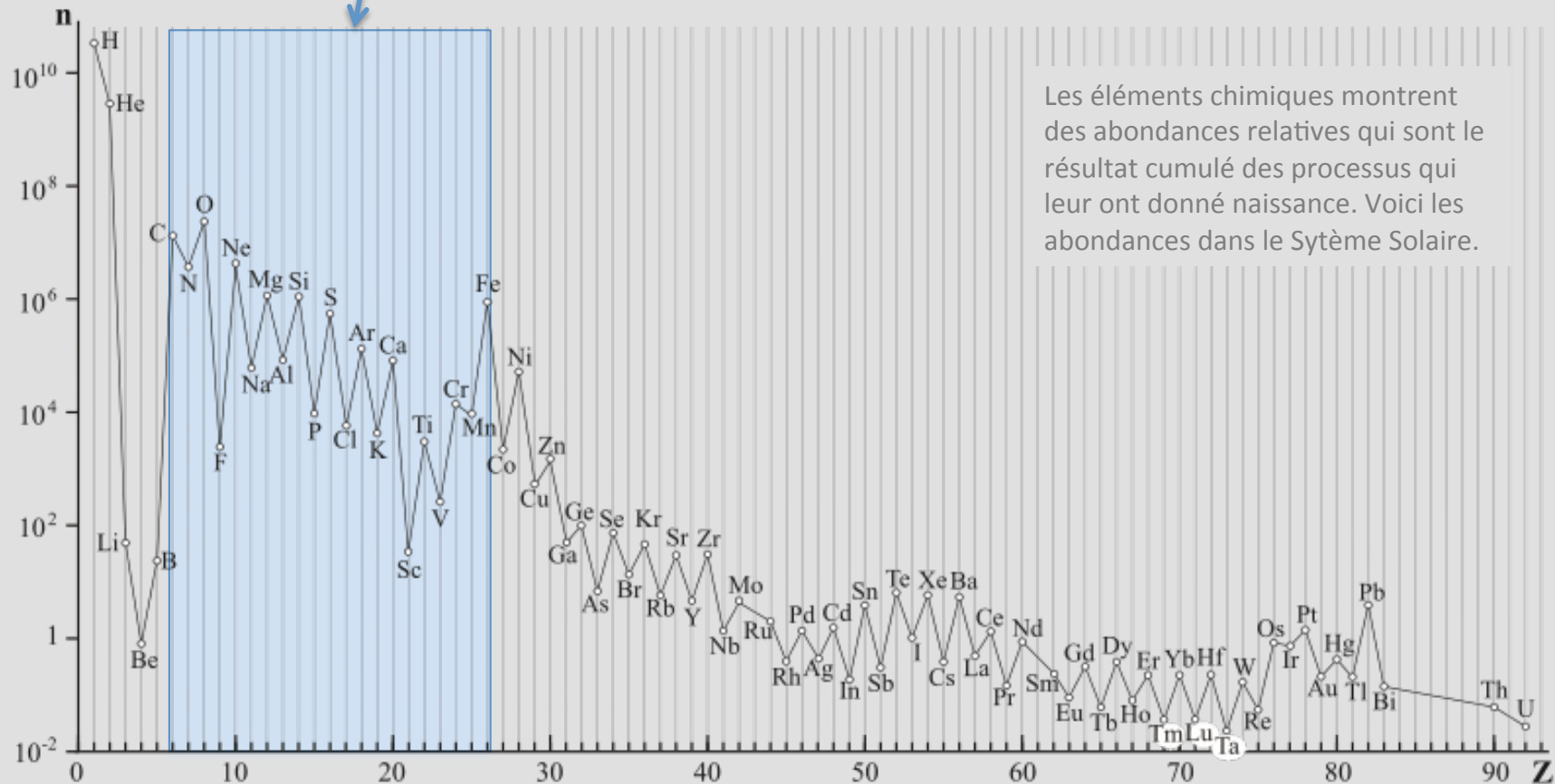
HD27808 (bas) a une abondance **normale**, de *Population I*, comme le Soleil. HD22879 (milieu) est **4 fois plus pauvre** en « métaux » que le Soleil. HD18445 (haut) est **100 fois plus pauvre** en « métaux ».

On remarque les vitesses très élevées des deux étoiles pauvres en « métaux ».

Les abondances

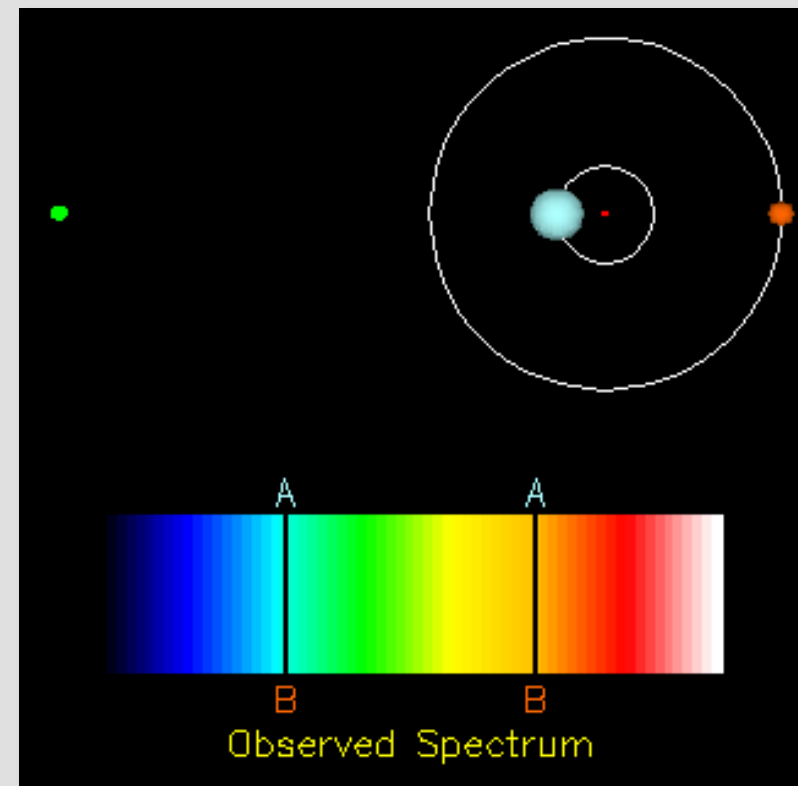
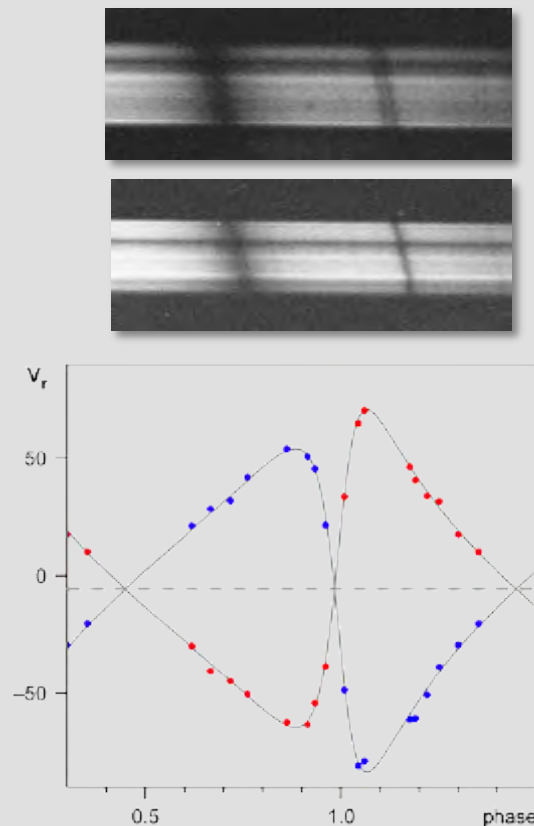
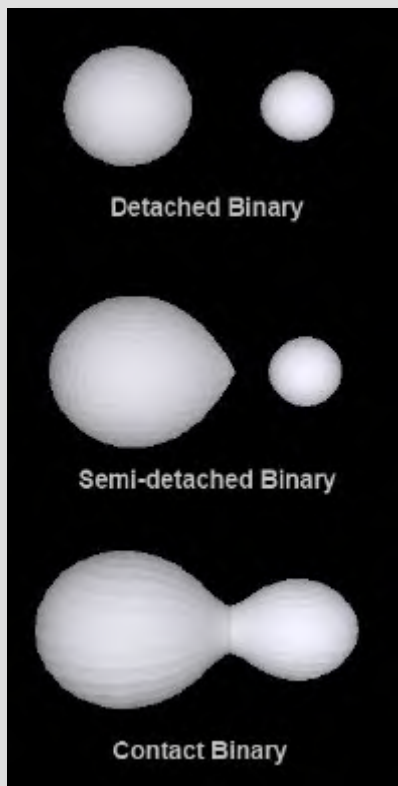
Les éléments entre le Carbone et le Fer ont été synthétisés au cœur des étoiles par des réactions de fusion produisant de l'énergie.

L'origine des éléments plus lourds que le Fer est plus compliquée : c'est le résultat d'autres réactions, **consommant de l'énergie**, de capture successive de neutrons à haute température, dans les étoiles très évoluées et dans les stades ultimes d'une supernova.



Les étoiles en couple

Grand nombre d'étoiles sont doubles car elles se sont formées au même temps. Certains couples sont très serrés et on les appelle des *binaires spectroscopiques*. Chaque étoile tourne autour du centre de gravité du système et donne lieu à un spectre. Mais on mesure l'ensemble des deux spectres. Le rapport des amplitudes des vitesses radiales permet, à l'aide des *lois de Kepler*, de déduire les masses relatives des étoiles. La première étoile de ce type, *Mizar* (Zeta dans la Grande Ourse), fut découverte en 1887 par l'équipe de Pickering.



Les étoiles tournantes

Les étoiles tournent sur elles-mêmes. Les plus chaudes tournent le plus vite, certaines en quelques heures, près de la limite où la force centrifuge risque de défaire l'étoile. *Altair*, deux fois la taille du Soleil, tourne en 9 heures.

Si l'orientation de l'*axe de rotation* est favorable nous verrons un bord de l'étoile s'éloigner et l'autre s'approcher. Ceci produira un **élargissement** des raies d'absorption par effet Doppler-Fizeau. Voici deux spectres obtenus avec ELODIE à l'OHP de HD76932 (haut) et HD89449 (bas), deux étoiles de type solaire.

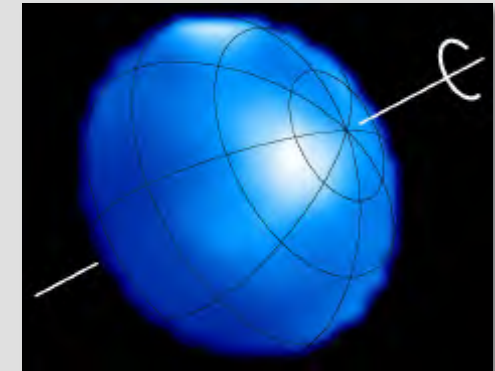
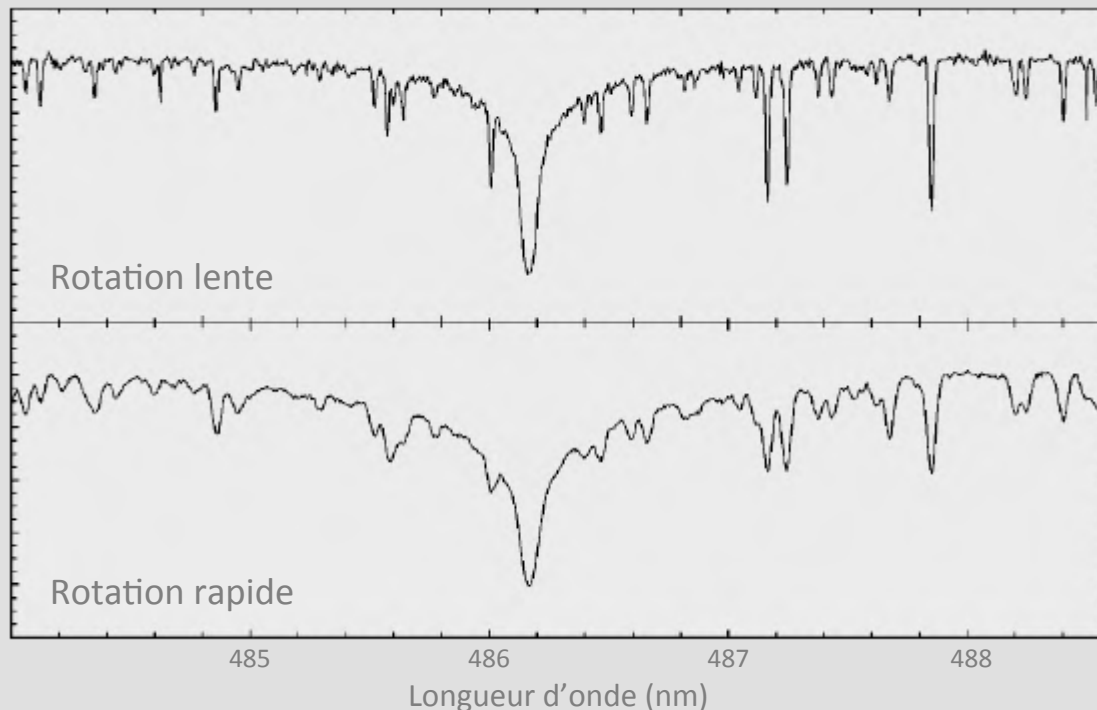
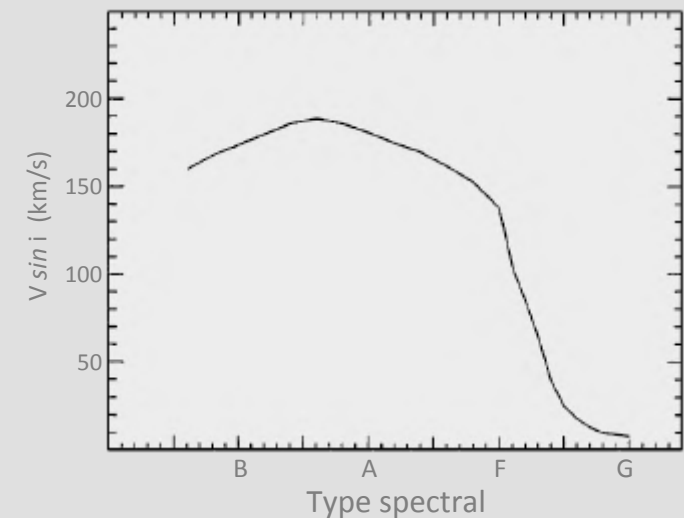


Image reconstruite de l'étoile *Altair* dont l'équateur tourne à 286 km/s. L'étoile apparaît aplatie aux pôles en imagerie interférométrique.



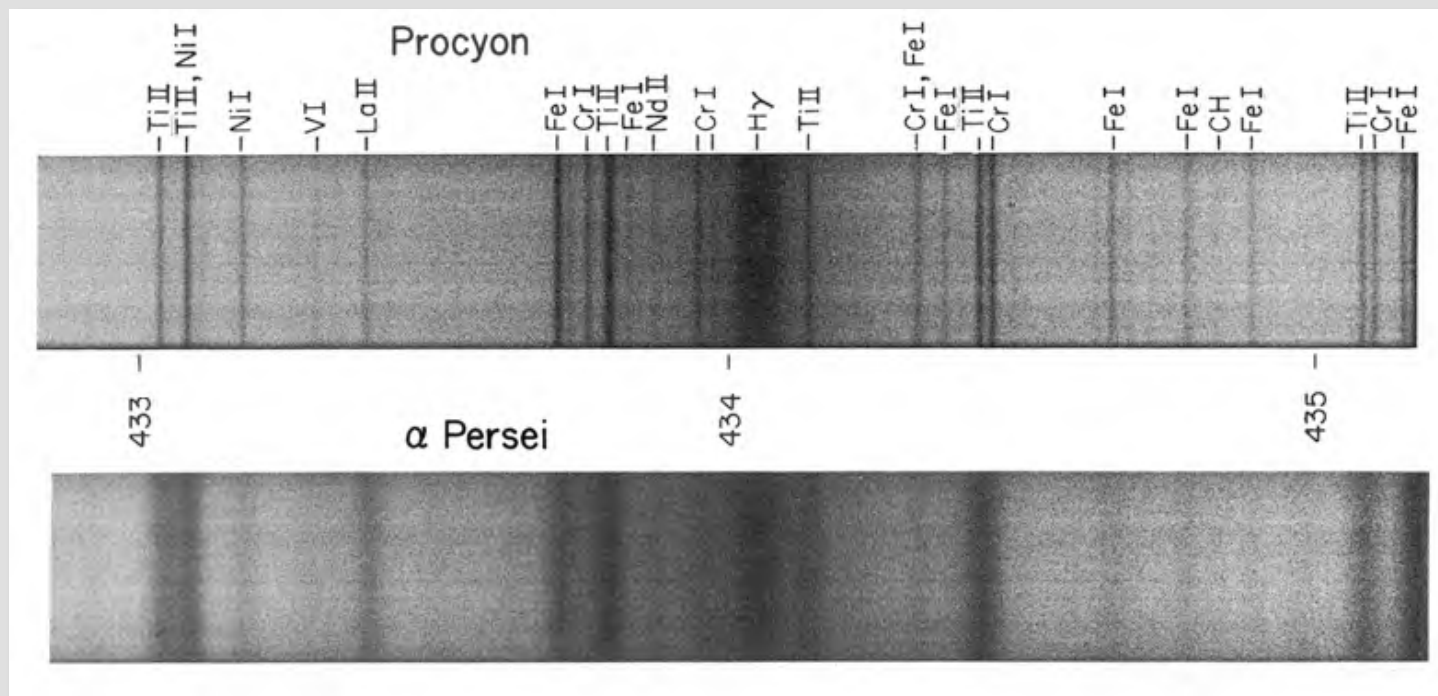
Les étoiles plus froides tournent plus lentement

Atmosphères turbulentes

Les étoiles *supergéantes*, avec des atmosphères très étendues, comme α Persée (*Mirfak*) ci-dessous, montrent des mouvements de matière convectifs désordonnés qui ont pour effet de **brouiller** les raies d'absorption, par l'effet Doppler-Fizeau. On appelle cela de la « **turbulence** ».

Le spectre de α Persée est comparé ici à *Procyon*, de même température mais *sous-géante*.

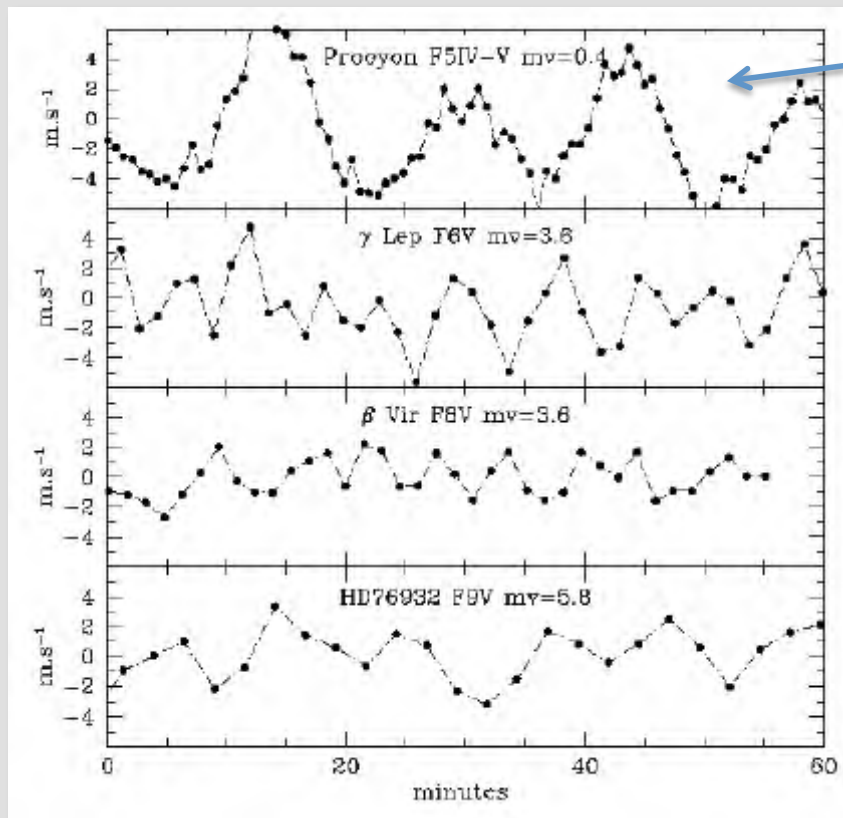
La plupart des raies dans cette petite partie du spectre, centré sur la raie H γ de l'hydrogène, sont dues au Fer²⁶, mais aussi au Titane²², Vanadium²³, Chrome²⁴ et Nickel²⁸ et aussi au Lantane⁵⁷ et au Neodymium⁶⁰, des *terres rares*. Tous ces éléments aussi présents dans le Soleil.



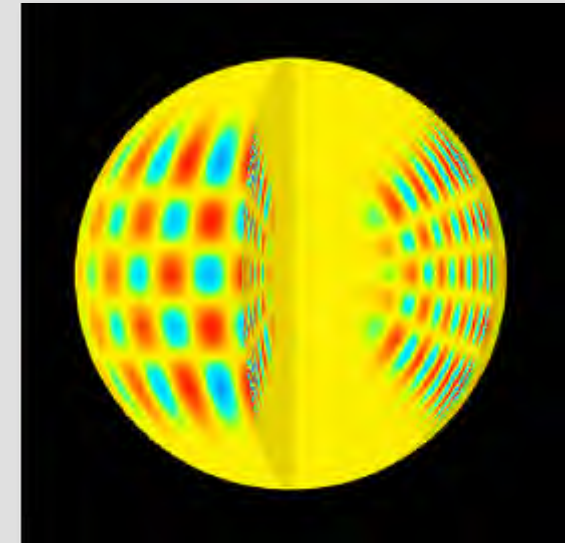
Les vibrations des étoiles

Les étoiles subissent des oscillations internes et peuvent *vibrer comme des cloches*. Plusieurs modes de vibration sont possibles :

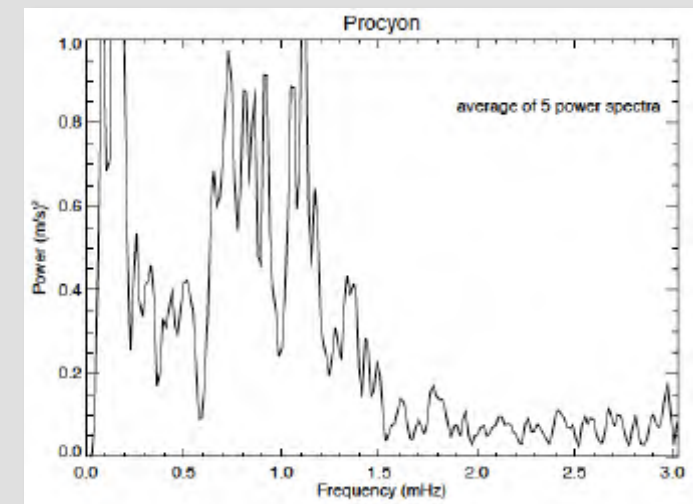
- **pression** (ondes acoustiques)
- **gravité** (poussée d'Archimède)
- **surface** (analogue à des vagues)



Les mouvements à la surface produisent des variations de la vitesse radiale **globale** que l'on peut mesurer.

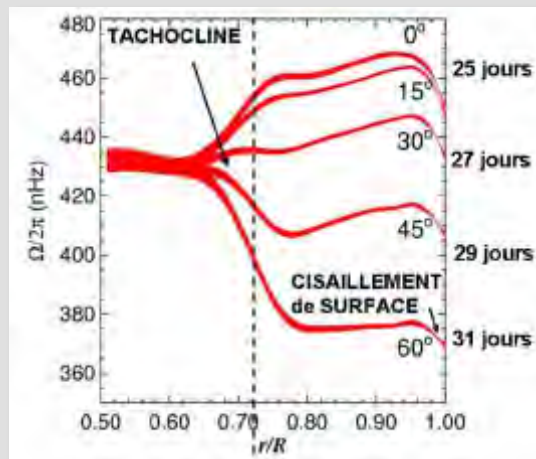
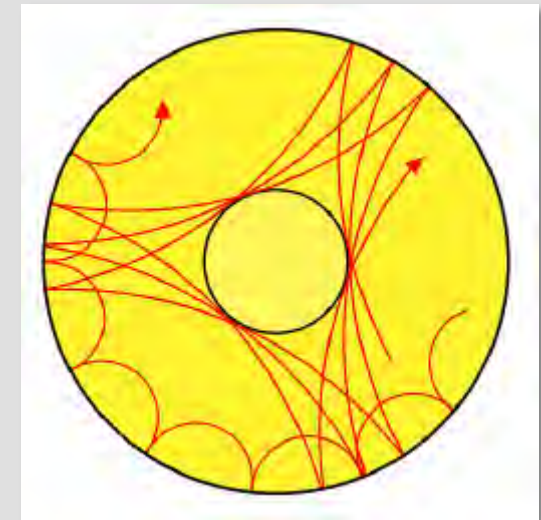
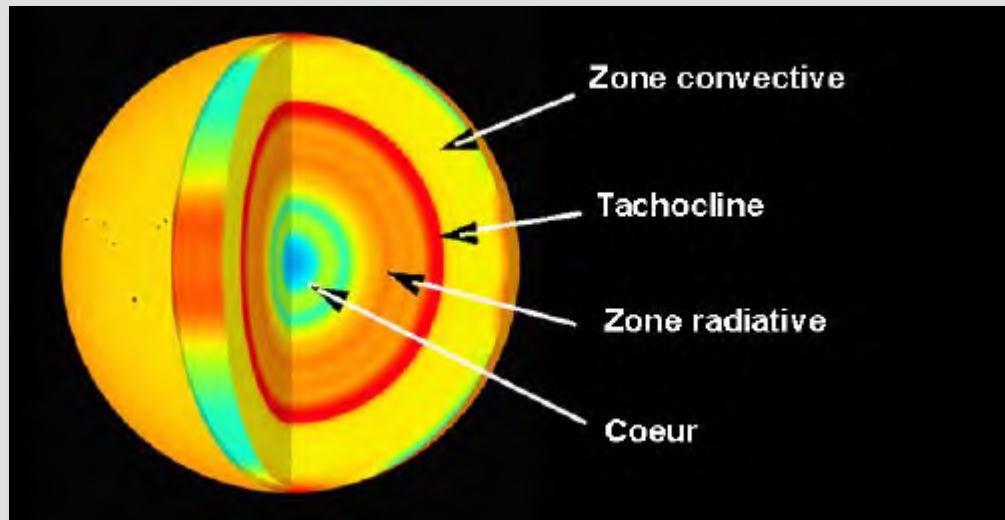


L'analyse temporelle des vitesses révèle que plusieurs fréquences peuvent co-exister.



Voir l'intérieur des étoiles

L'interprétation des résultats obtenus par l'**astérosismologie** par une modélisation numérique de la *propagation* des ondes permet en quelque sorte de « voir » l'intérieur des étoiles.

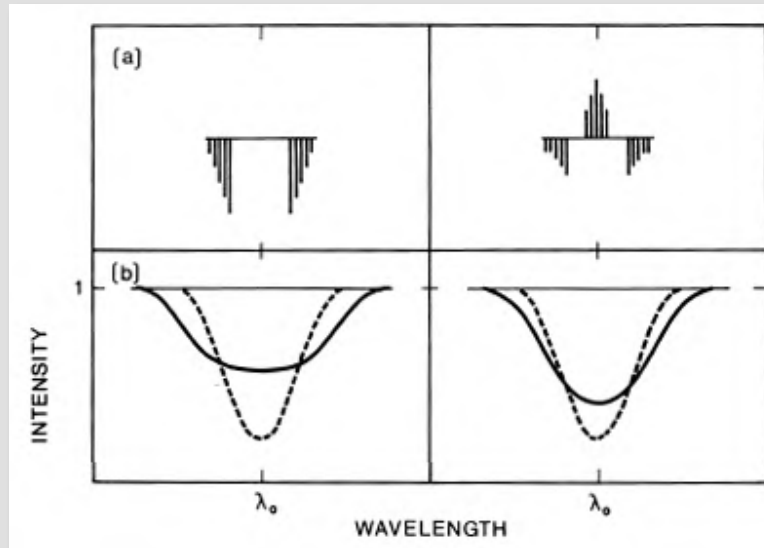


La surface du Soleil ne tourne pas de manière uniforme : à l'équateur la période de rotation est de 26 jours mais c'est 38 jours près du pôle (*rotation différentielle*).

Mais l'astérosismologie montre que l'intérieur du Soleil tourne uniformément, comme un corps solide. La limite (*tachocline* = ligne d'égale vitesse) se situe 30% sous la surface.

Les étoiles magnétiques

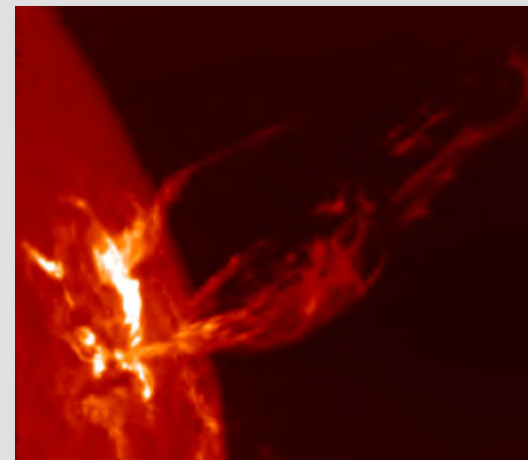
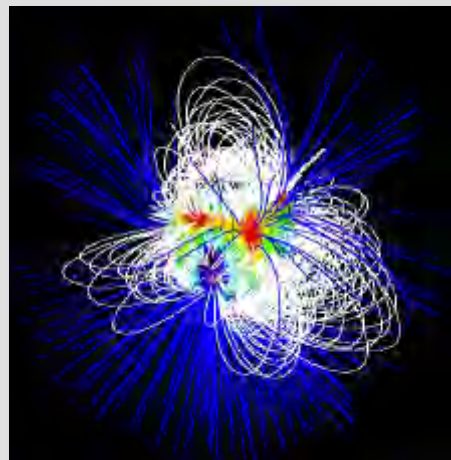
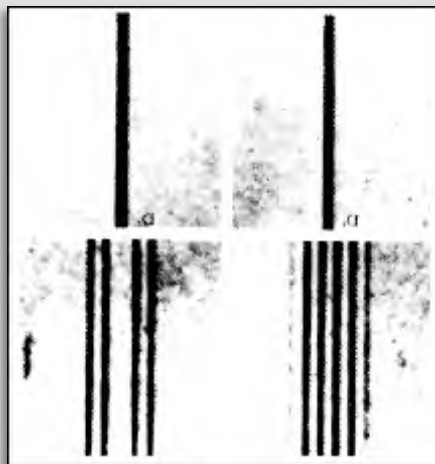
Pieter Zeeman montra en 1897 que les raies spectrales de certains éléments (ci-dessous les raies D du Sodium) pouvaient se décomposer en multiples composantes sous l'influence d'un champ magnétique. C'est l'effet Zeeman.



Si le champ magnétique est fort, la mesure de l'écartement des composantes donne la valeur du champ.

Pour les champs faibles les raies sont simplement **élargies**.

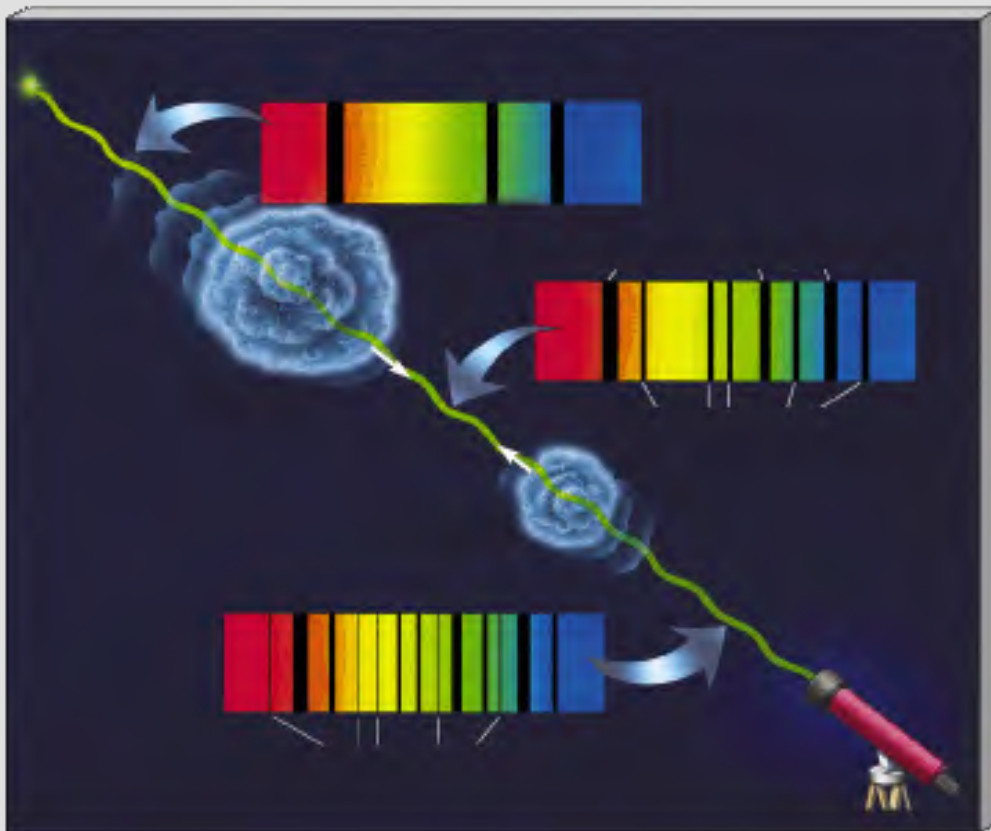
Il y a des étoiles avec des champs plus de 20000 fois celui de la Terre.



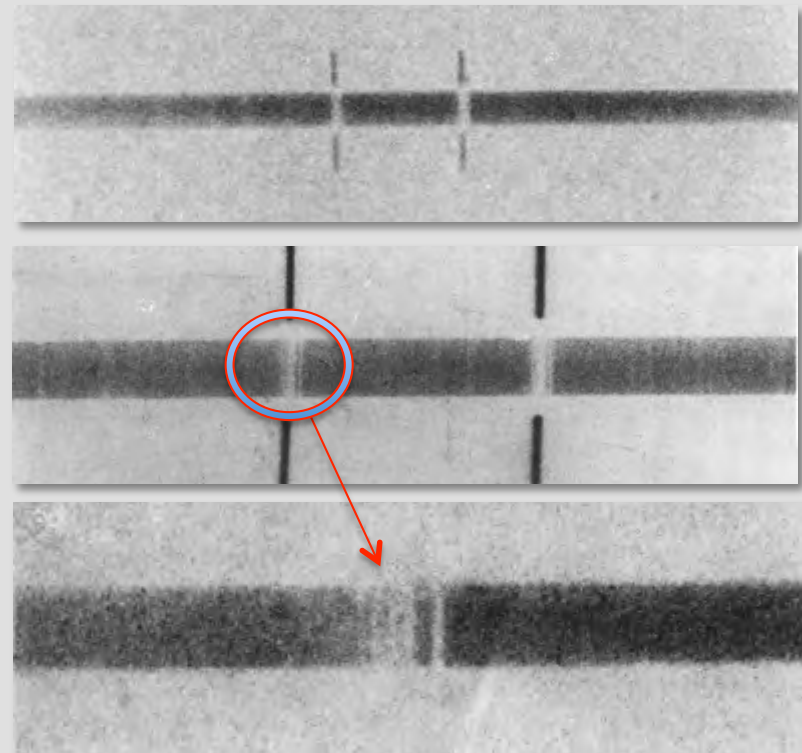
Les champs magnétiques sont présents sur toutes les étoiles, même sur le Soleil.

Des nuages dans le chemin

Si des nuages froids se trouvent dans la ligne de visée d'une étoile ils absorberont de la lumière aux longueurs d'onde caractéristiques des raies de résonance des atomes de Sodium ou du Calcium. Comme ces nuages sont froids, les raies seront très fines. Il y en aura autant de raies que de nuages.



Raies D du Sodium dans le spectre de l'étoile *Deneb*. Trois spectres TGR pris à l'OHP à des dispersions différentes.

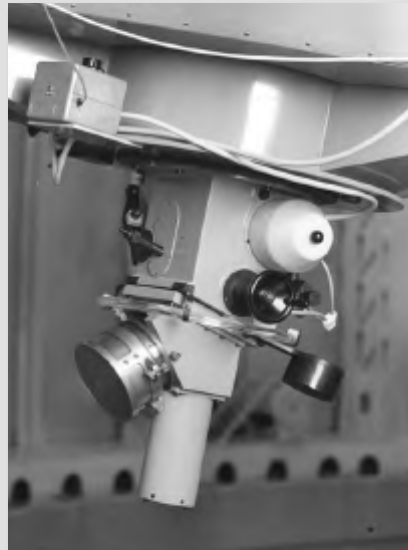


Quelques spectrographes de l'OHP

Spectro C (1944)



Spectro O (1963)



ELODIE (1993)



SOPHIE (2006)



Tremblot (1936)

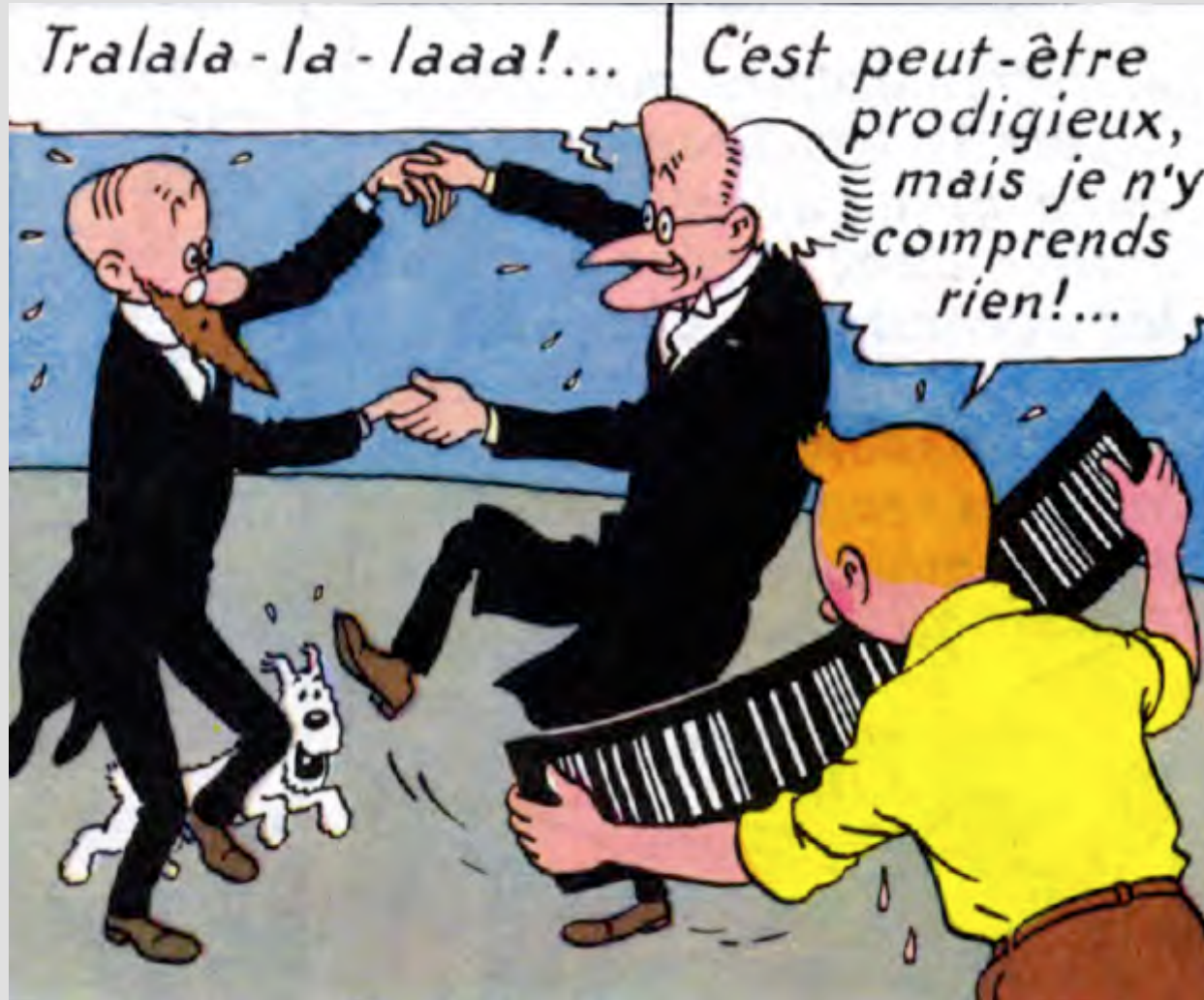


Coudé 152 (1970)



CARELEC (1986)

Merci de votre attention



L'Etoile Mystérieuse (Hergé)