

Astronomie, Astrophysique

Observer et comprendre l'Univers

Université inter-âges
Paris-Sorbonne

Frédéric Daigne, Institut d'Astrophysique de Paris
Université Pierre et Marie Curie
Institut Universitaire de France

A dense field of galaxies in various colors and orientations against a dark background. The galaxies are scattered across the frame, with some appearing as bright, elongated structures and others as smaller, more distant points of light. The colors range from bright yellow and orange to deep red and purple, suggesting a wide range of stellar populations and distances.

Lundi 5 décembre 2011

6. Vie et mort des étoiles

Vie et mort des étoiles



Les étoiles dans le ciel

Il y a environ 6000 étoiles visibles à l'œil nu dans le ciel (hémisphères nord et sud).

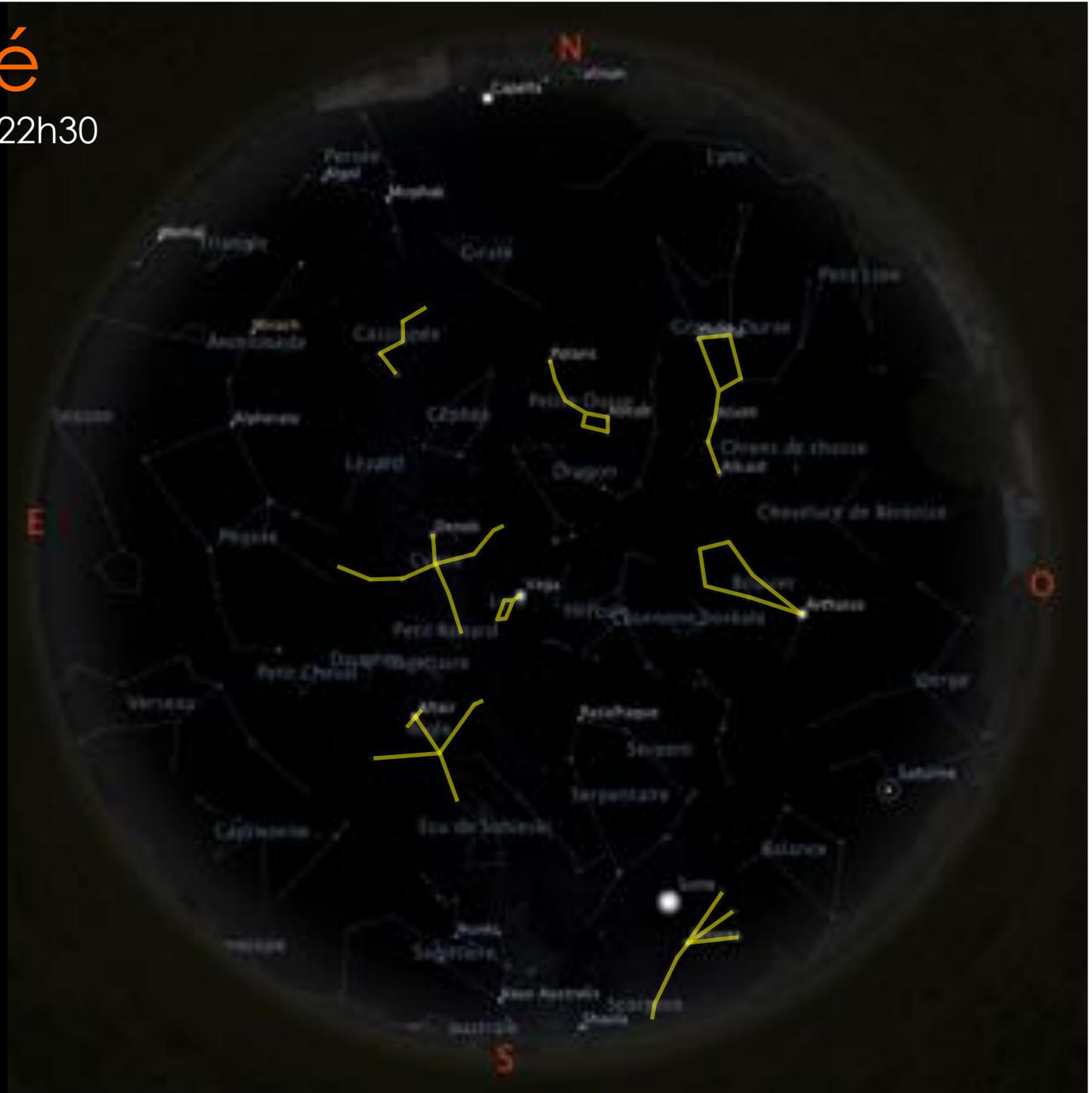


Les étoiles plus brillantes ont des noms traditionnels (Vega, Deneb, Altair, etc.).

Les constellations servent à repérer des directions dans le ciel et permettent de nommer les étoiles : Arcturus = α Bootis = l'étoile la plus brillante dans le bouvier (désignation de Bayer, astronome allemand, 1572-1625).

Ciel d'été

Paris, 15 août 2012, 22h30



Les étoiles dans le ciel

On trouve des étoiles dans toutes les directions, mais il y a une accumulation remarquable le long de la Voie Lactée (→ cours n°9). On estime à 100 milliards le nombre d'étoiles dans la Galaxie.



Les amas d'étoiles

On trouve localement des accumulations d'étoiles : les amas stellaires. Les amas *globulaires* seront abordés au cours n°9. Les amas *ouverts* sont constitués d'étoiles jeunes, et témoignent que les étoiles naissent en groupe (→ cours n°8).



Les « 7 sœurs »
des Pléiades



L'amas ouvert des Pléiades
à 440 années lumière

(~ 3000 étoiles, âge ~ 100 millions d'années)

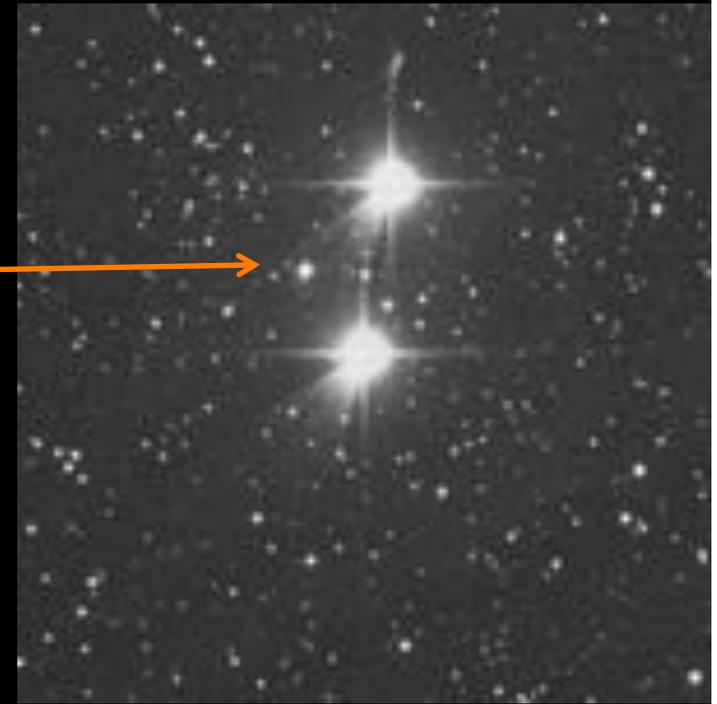
Les étoiles dans le ciel

Les amas ouverts disparaissent en environ 1 milliard d'années (rotation dans la Voie Lactée, perturbations gravitationnelles externes, ...). Les étoiles de la grande ourse constituent sans doute un amas ouvert âgé en train de se disperser. L'amas auquel le Soleil appartenait lors de sa naissance a disparu.



Les étoiles dans le ciel

Comme les étoiles naissent en groupe, les systèmes binaires (ou multiples) sont fréquents : deux étoiles qui orbitent l'une autour de l'autre.



Exemple: l'étoile ϵ de la Lyre est double (en fait double-double).

Les systèmes binaires

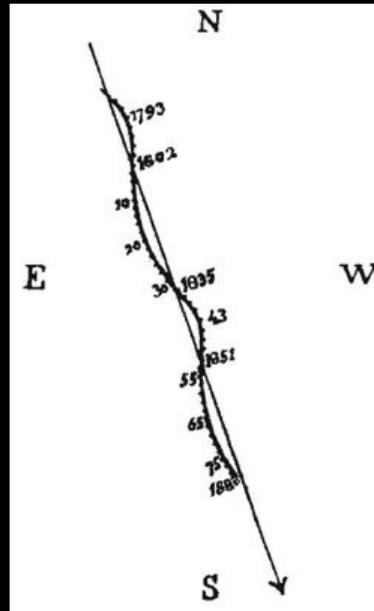
Il y a plusieurs possibilités pour identifier un système binaire de deux étoiles :

- Les binaires visuelles : on distingue le mouvement apparent des deux étoiles.

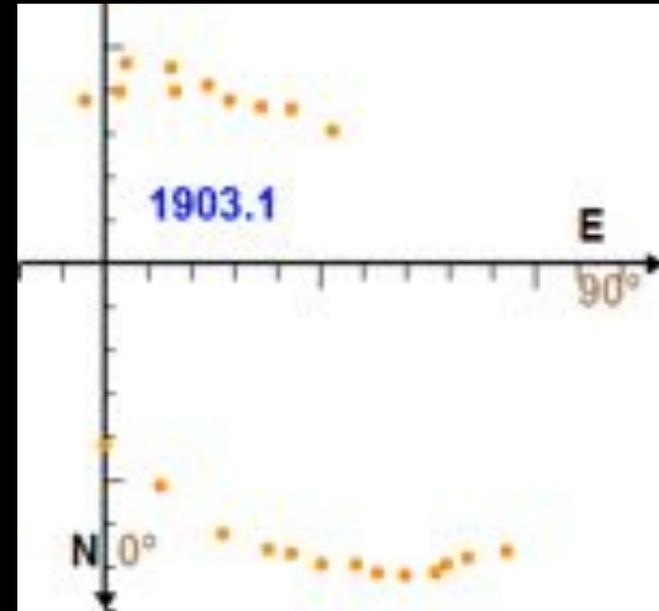
Exemple : Sirius A et B



Sirius A et B (HST)



Le mouvement de Sirius A et B
(dessin de Flammarion)



Le mouvement de Sirius B par rapport à Sirius A

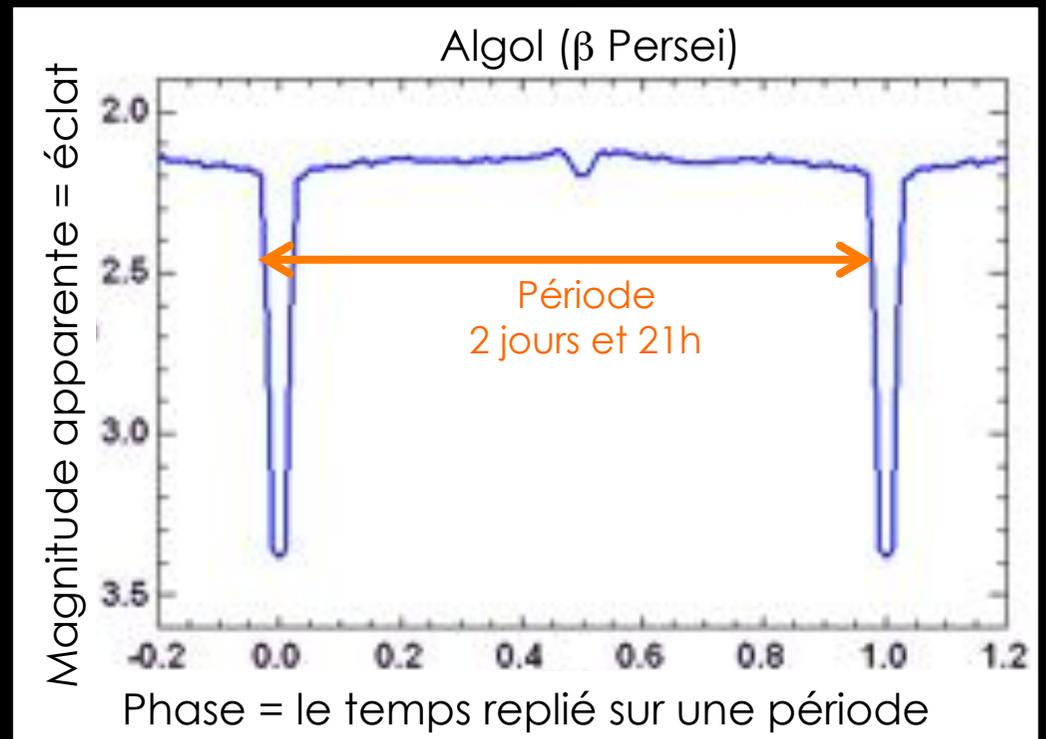
Période orbitale = 49,9 ans
Séparation angulaire moyenne = 7,4''

Les systèmes binaires

Il y a plusieurs possibilités pour identifier un système binaire de deux étoiles :

- Les binaires visuelles
- Les binaires à éclipses : on ne distingue pas les deux étoiles, qui apparaissent comme une étoile unique, brillante et variable de manière périodique.

Exemple: β Persei = Algol (*esprit changeant*) : variations d'éclat visibles à l'œil nu.

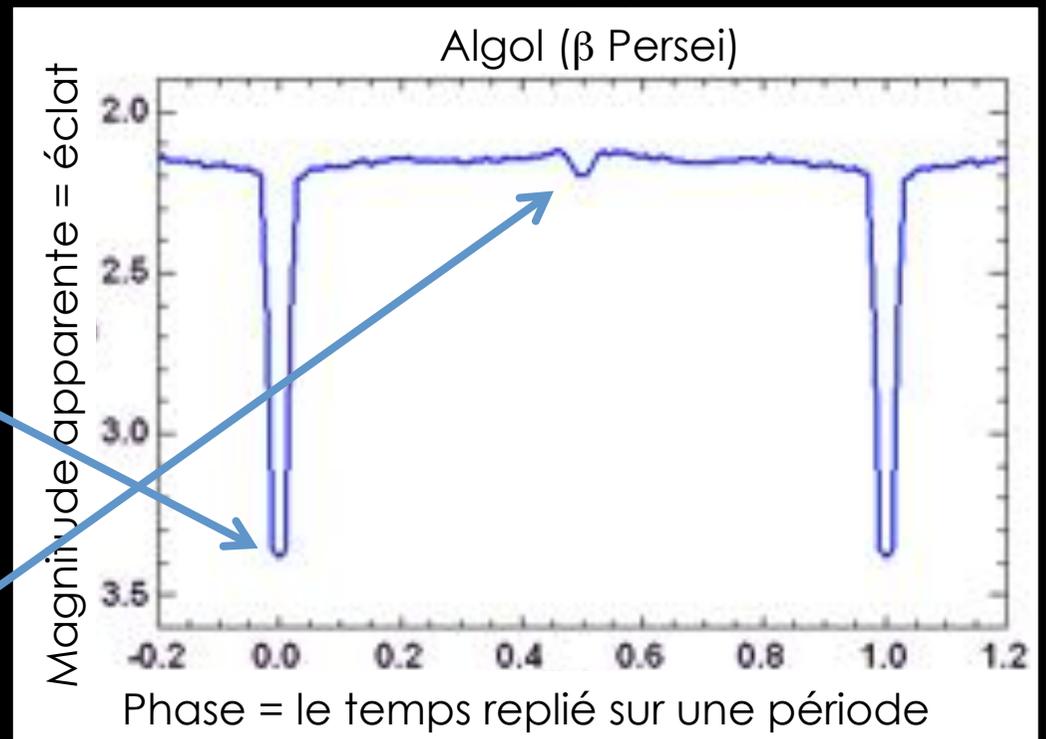


Les systèmes binaires

Il y a plusieurs possibilités pour identifier un système binaire de deux étoiles :

- Les binaires visuelles
- Les binaires à éclipses : on ne distingue pas les deux étoiles, qui apparaissent comme une étoile unique, brillante et variable de manière périodique.

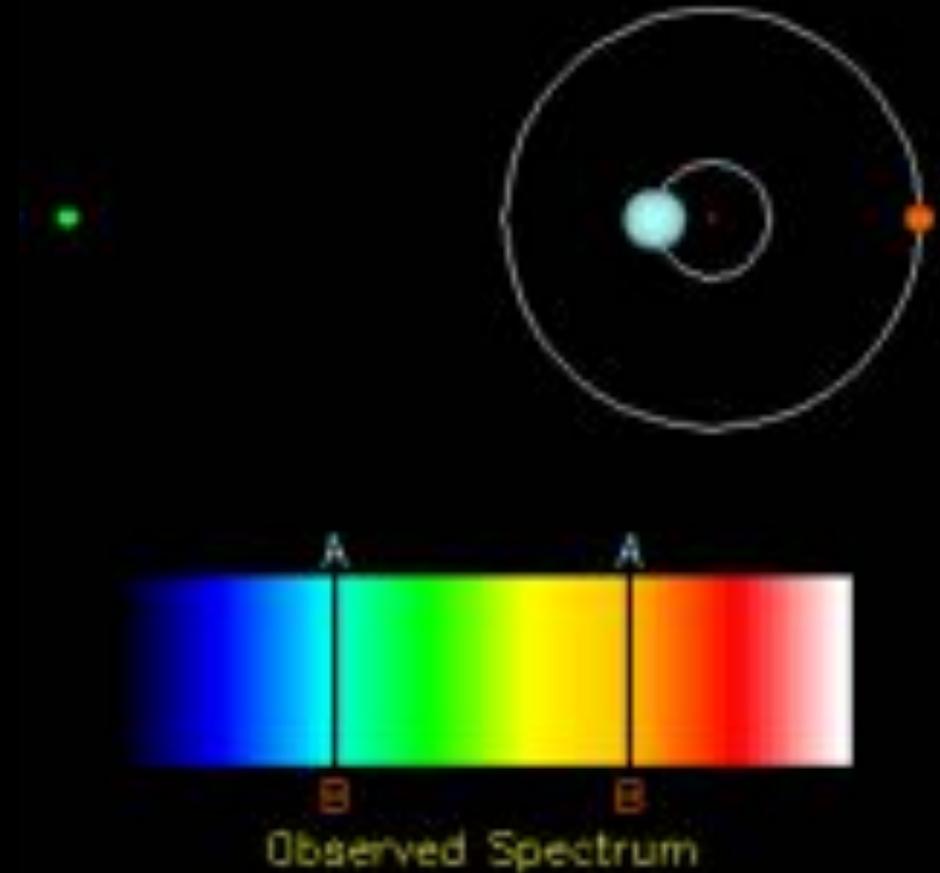
Exemple: β Persei = Algol (*esprit changeant*) : variations d'éclat visibles à l'œil nu.



Les systèmes binaires

Il y a plusieurs possibilités pour identifier un système binaire de deux étoiles :

- Les binaires visuelles
- Les binaires à éclipses
- Les binaires spectroscopiques : on détecte le mouvement orbital par le déplacement des raies (effet Doppler, cf. la méthode des vitesses radiales pour la détection des exoplanètes, cours n°5)

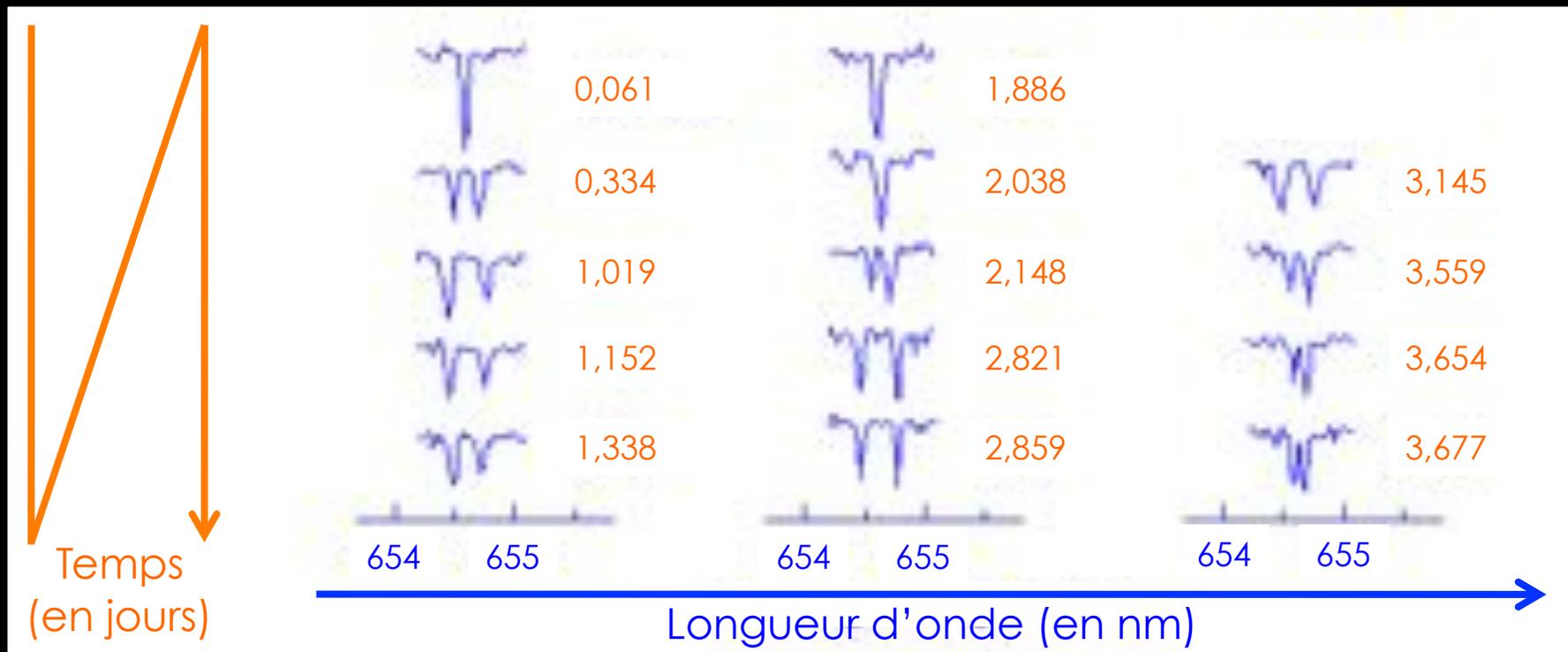


Les systèmes binaires

Il y a plusieurs possibilités pour identifier un système binaire de deux étoiles :

- Les binaires visuelles
- Les binaires à éclipses
- Les binaires spectroscopiques : on détecte le mouvement orbital par le déplacement des raies (effet Doppler, cf. la méthode des vitesses radiales pour la détection des exoplanètes, cours n°5)

Exemple : HD 80715



Diversité des étoiles

Les étoiles apparaissent très diverses en terme d'éclat, de couleur, etc...

En bons astrophysiciens :

- apprenons à mesurer ces propriétés pour un grand nombre d'étoiles
- essayons d'en déduire la structure et l'évolution des étoiles, en utilisant les lois de la physique



L'amas ouvert de la boîte à bijoux (ESO)

« Cette obscure clarté qui tombe des étoiles »
(Corneille, Le Cid, Acte IV, scène 3, Rodrigue)

Mesurer les propriétés des étoiles

Le Soleil est bien connu (cf. cours n°2). Pour étudier les autres étoiles, il faut pouvoir mesurer leurs propriétés physiques alors qu'elles sont beaucoup plus loin.

- La luminosité
- La température
- La masse
- Le rayon
- La composition chimique
- La rotation
- Le magnétisme
- La structure des régions périphériques (« surface », couronne, ...)
- La structure interne

etc...

Luminosité d'une étoile

Le principe est le même que pour le Soleil, on mesure le flux lumineux reçu de l'étoile (en W/m^2) et on déduit la luminosité (en W) si on connaît la distance.

La distance est mesurée par la parallaxe annuelle (cf. cours n°1).

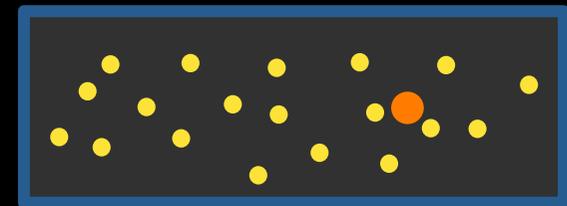
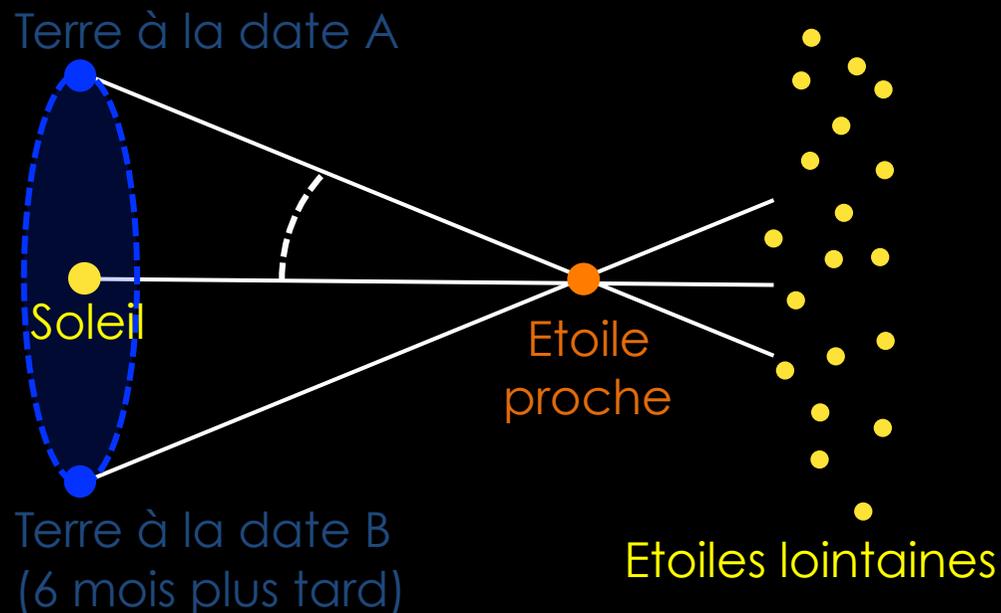


Image à la date A

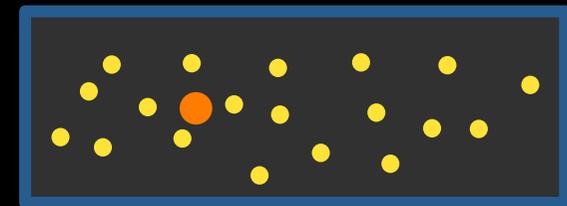


Image à la date B

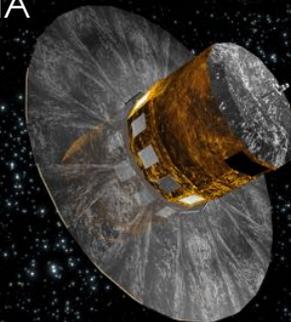


Hipparcos

Mesures précises de la distance :

- Hipparcos (ESA, années 90) : ~2,5 millions d'étoiles
- GAIA (ESA, lancement en 2013) : 116 millions d'étoiles
(à 5% près, dont 21 millions à 1 % près)

GAIA



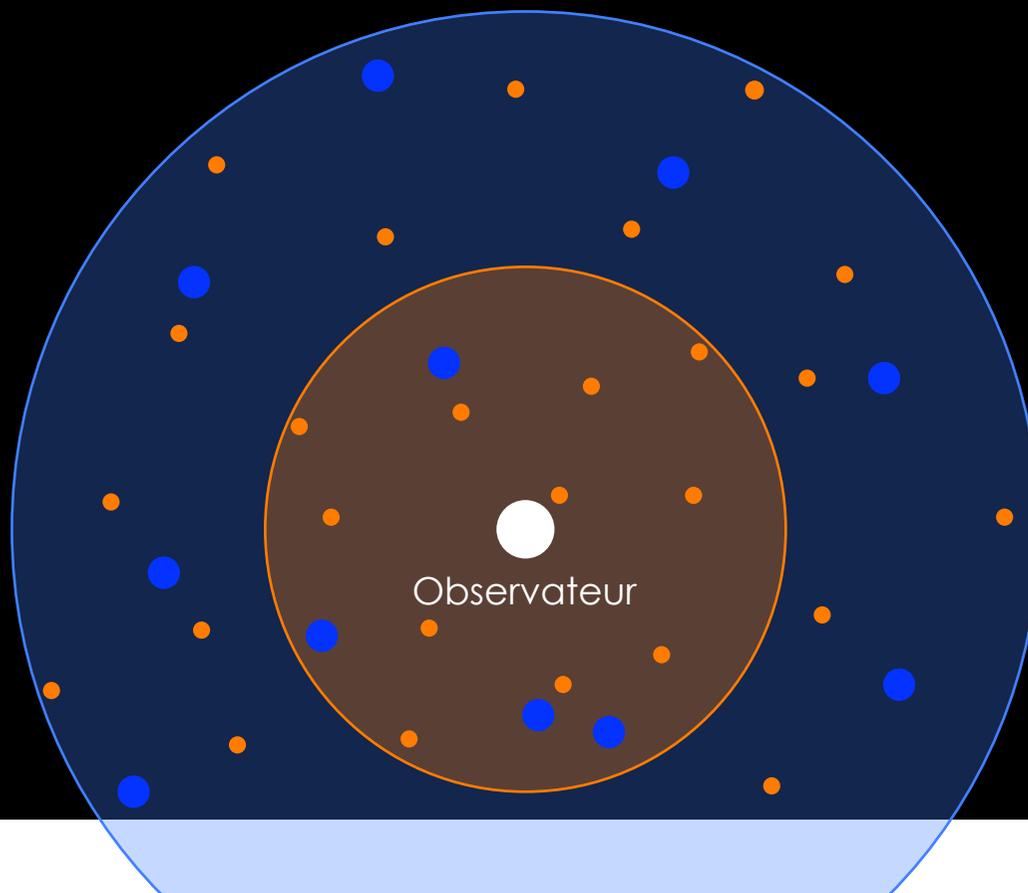
Combien d'étoiles dans la Galaxie?

Lorsque l'on compte les étoiles, il faut tenir compte du fait qu'elles n'ont pas toutes la même luminosité.

Les instruments ne peuvent pas détecter des objets en dessous d'un certain flux :

- Les étoiles de faibles luminosité ne sont détectées qu'à courte distance
- Les étoiles de forte luminosité sont détectées jusqu'à grande distance

Le volume observé dépend de L : les étoiles lumineuses sont sur-représentées !



- Géante bleue (très lumineuse)
- Naine rouge (peu lumineuse)

En corrigeant cet effet, on peut estimer le nombre d'étoiles dans la Voie Lactée : 100 milliards !

Hipparcos et même GAIA ne mesurent la distance que d'une toute petite fraction des étoiles...

Mesurer la température et la composition chimique

C'est finalement ce qu'il y a de plus facile à mesurer, grâce à la spectroscopie !
(cf. cours n°2 et n°3)



« On peut imaginer déterminer la forme des étoiles, leurs distances, leurs tailles et leurs mouvements, mais il n'y a aucun moyen envisageable qui nous permettrait un jour de déterminer leur composition chimique, leur structure minéralogique ou la nature des organismes vivants qui vivent à leur surfaces. Nos connaissances concernant les étoiles sont nécessairement limitées à leur comportement géométrique et mécanique » (Auguste Comte, Cours de philosophie positive, 1830)

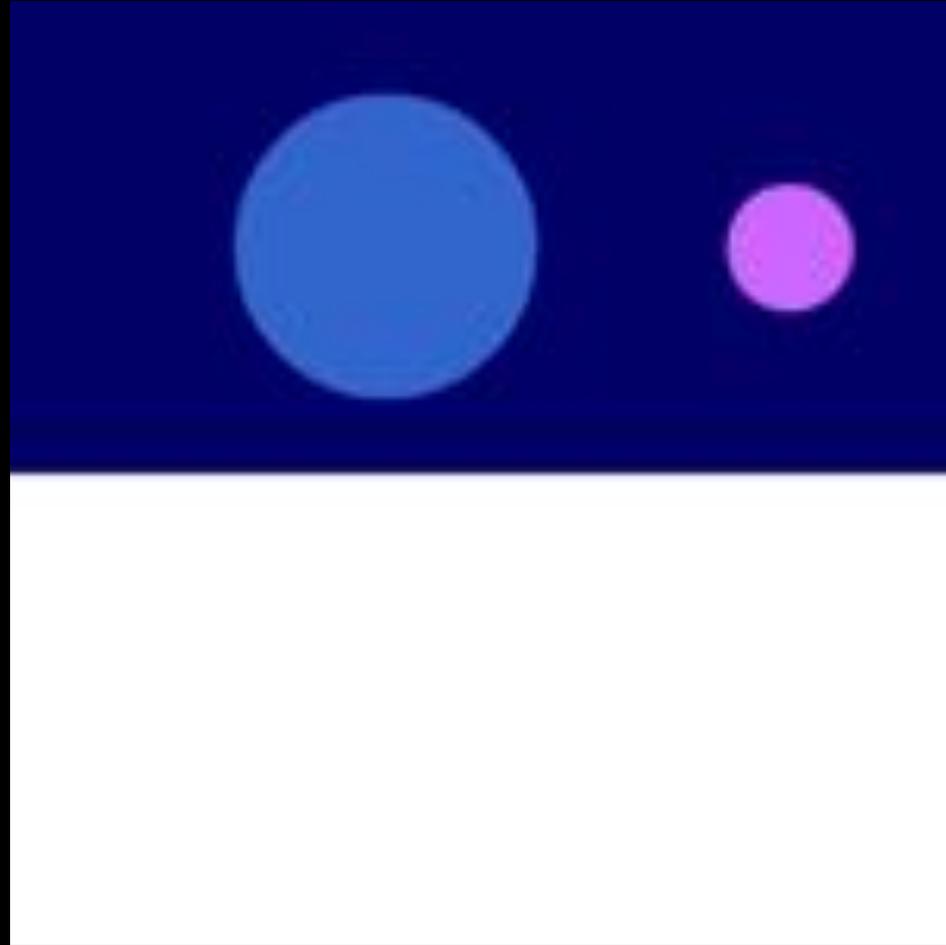
Mesurer le rayon

Le rayon peut se déduire de la mesure de la luminosité et de la température.

- La luminosité L est la puissance totale rayonnée par l'étoile (W)
- La température fixe la puissance σT^4 rayonnée *par unité de surface* (W/m²)
- Le rapport des deux donne la surface et donc le rayon !

Dans certains cas, on peut faire une mesure directe :
les systèmes binaires à éclipses.

(cf. méthode des transits
pour les exoplanètes, cours n°5)



Mesurer la taille d'une étoile

Le rayon des étoiles est tellement petit par rapport à leur distance qu'elles nous apparaissent comme des sources ponctuelles (à l'exception du Soleil).

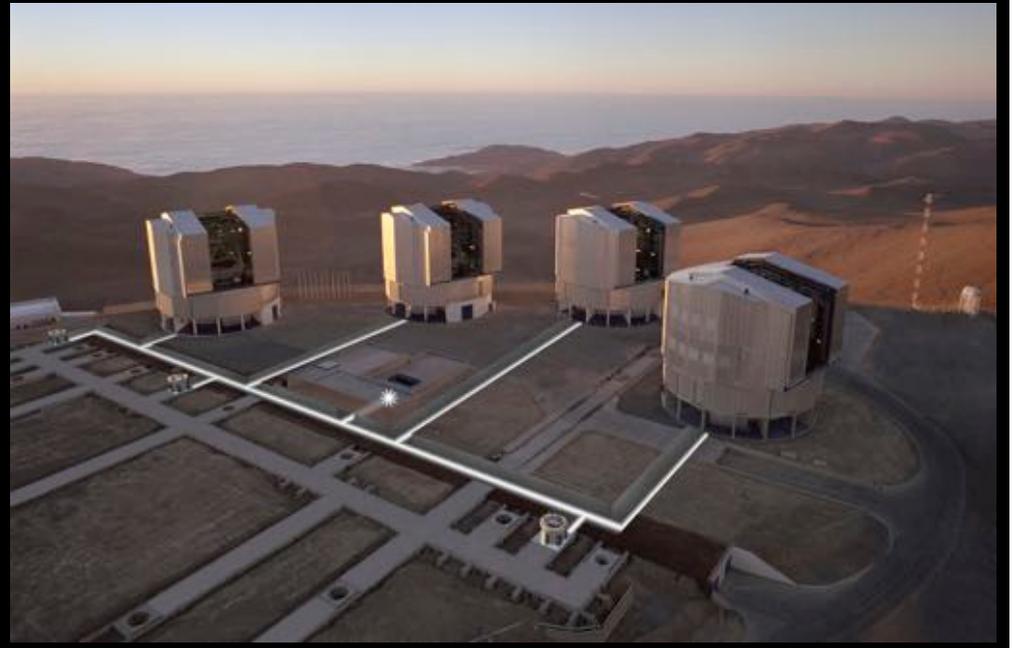
- Exemple 1 : Proxima Centauri (α Centauri) est l'étoile la plus proche du Soleil
 - Distance = 4,22 années lumière
 - Rayon = 1/7 du rayon solaire
 - Rayon apparent \sim 1 milli-seconde d'arc
(=rayon apparent d'une pièce de 1€ à 1700 km)
- Exemple 2 : Bételgeuse
 - Distance = 427 années lumière
 - Rayon = 600 fois le rayon solaire
 - Rayon apparent \sim 21 milli-secondes d'arc
(=rayon apparent d'une pièce de 1€ à 80 km)
- Il n'est donc pas possible de faire des images avec des télescopes classiques et de mesurer le rayon.

(les meilleurs télescopes peuvent mesurer des séparations angulaires de l'ordre de 0,1'' seulement)

Mesurer la taille d'une étoile

Le rayon des étoiles est tellement petit par rapport à leur distance qu'elles nous apparaissent comme des sources ponctuelles (à l'exception du Soleil).

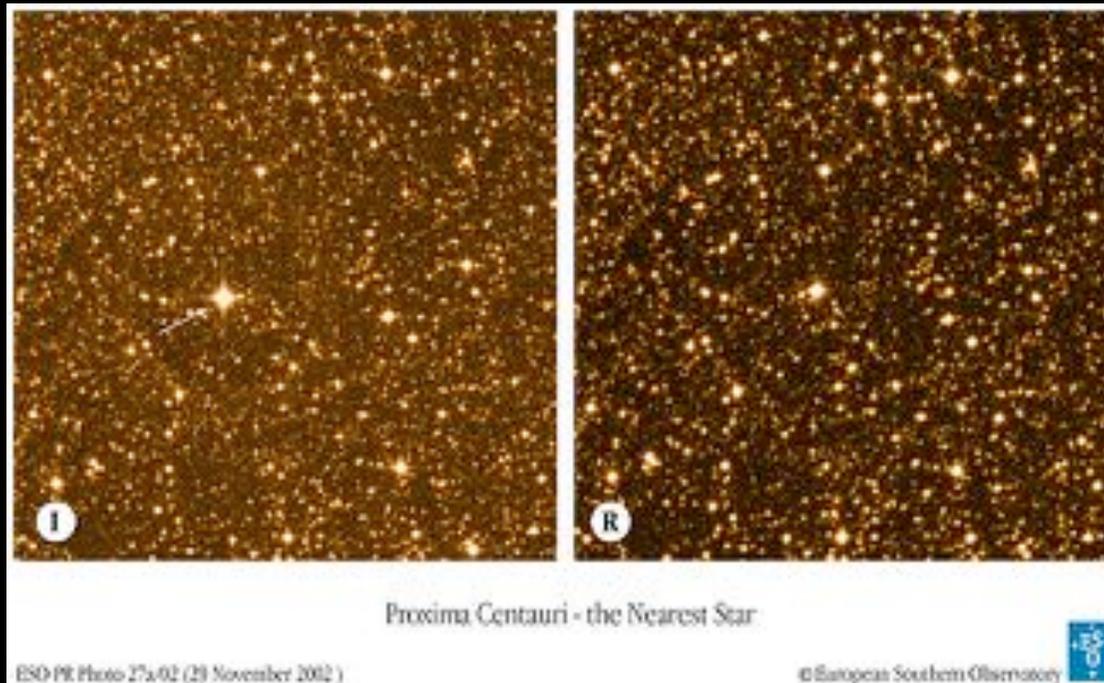
- Sans faire de vraie image, on peut obtenir une image partielle qui permet de mesurer le rayon d'une étoile, en combinant la lumière de plusieurs télescopes par interférométrie (une méthode qui utilise la nature ondulatoire de la lumière).
- La résolution angulaire augmente avec la distance entre les télescopes.
- La VLTI utilise la combinaison des 4 VLT au mont Paranal (séparation maximale ~200 m) et atteint une résolution angulaire de quelques milli-secondes d'arc !



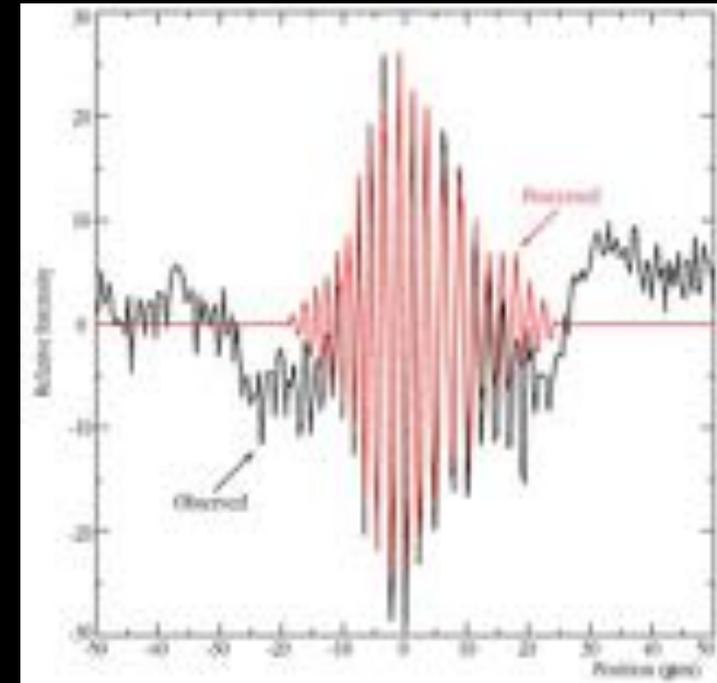
Résoudre une étoile

Quelques rayons d'étoiles ont pu être mesuré directement par interférométrie.

- Première mesure : Bételgeuse par Michelson & Pease au Mont Wilson (1920-21) (Bételgeuse est beaucoup plus grosse que le Soleil : $\sim 600 \times$)
- Etoiles « normales » : il a fallu attendre les années 2000...



Rayon de Proxima du Centaure mesuré par VLTI
Taille apparente : 1.02 ± 0.08 milli-secondes d'arc
 $D = 4,22$ ly (parallaxe) donc $R = R_{\text{Soleil}}/7$.



Mesurer la masse

On utilise la 3^{ème} loi de Képler (cf. cours n°1).

- Pour le Soleil:
 - On connaît la distance Terre-Soleil
 - On connaît la période de la Terre (1 an)
 - On déduit la masse du Soleil (cf. cours n°2)



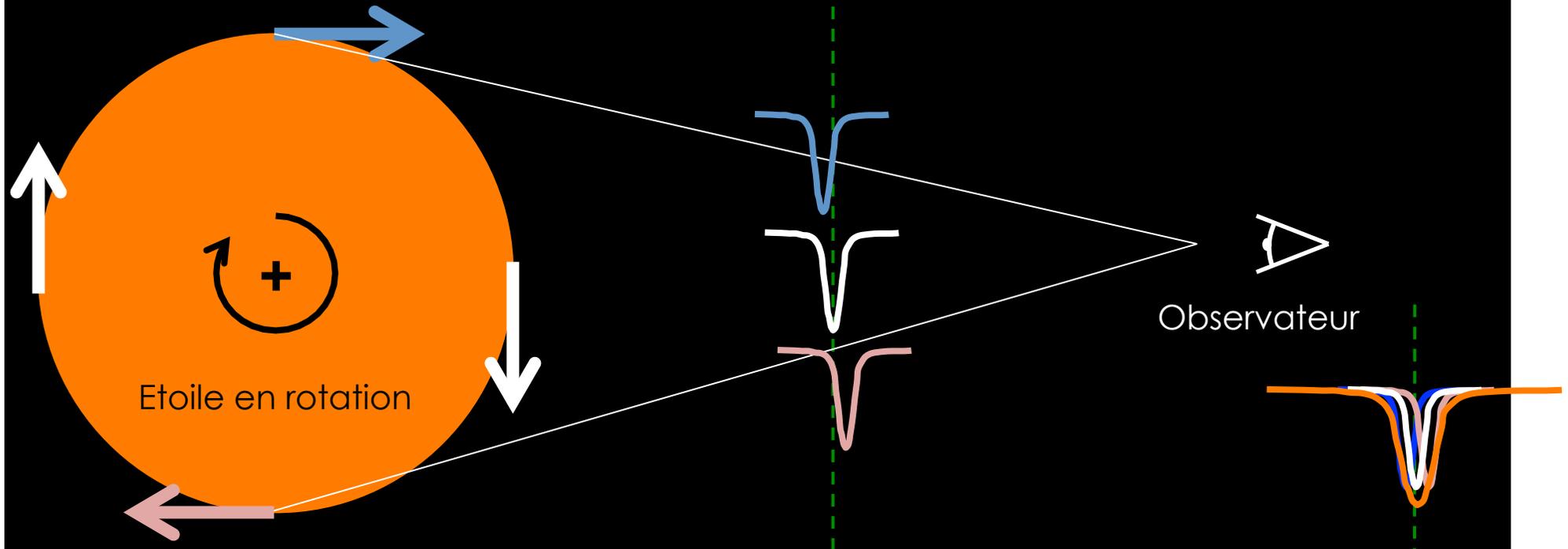
Johannes Kepler
(1571-1630)

- Pour les autres étoiles, il faut qu'elles aient un compagnon
- On ne connaît précisément les paramètres orbitaux que de quelques milliers de systèmes binaires d'étoiles : les mesures de masse restent rares...

Mesurer la rotation

- Pour le Soleil :
la vitesse de rotation est mesurée à partir de l'observation des taches solaires.
- Pour les autres étoiles, la vitesse de rotation est étudiée par spectroscopie, les raies d'une étoile en rotation étant élargies par effet Doppler.

Bord de l'étoile qui s'approche de l'observateur : lumière décalée vers le bleu

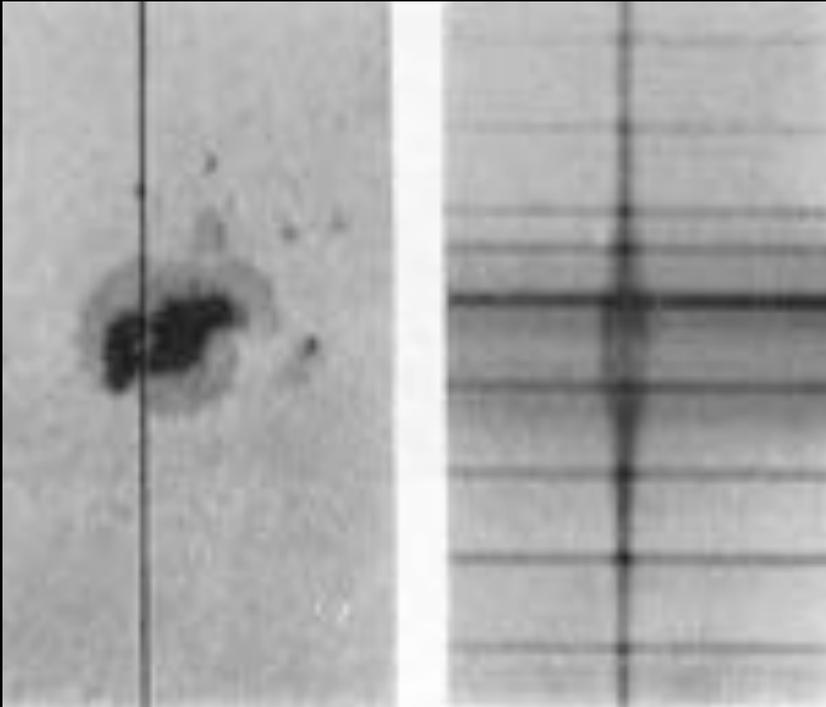


Bord de l'étoile qui s'éloigne de l'observateur : lumière décalée vers le rouge

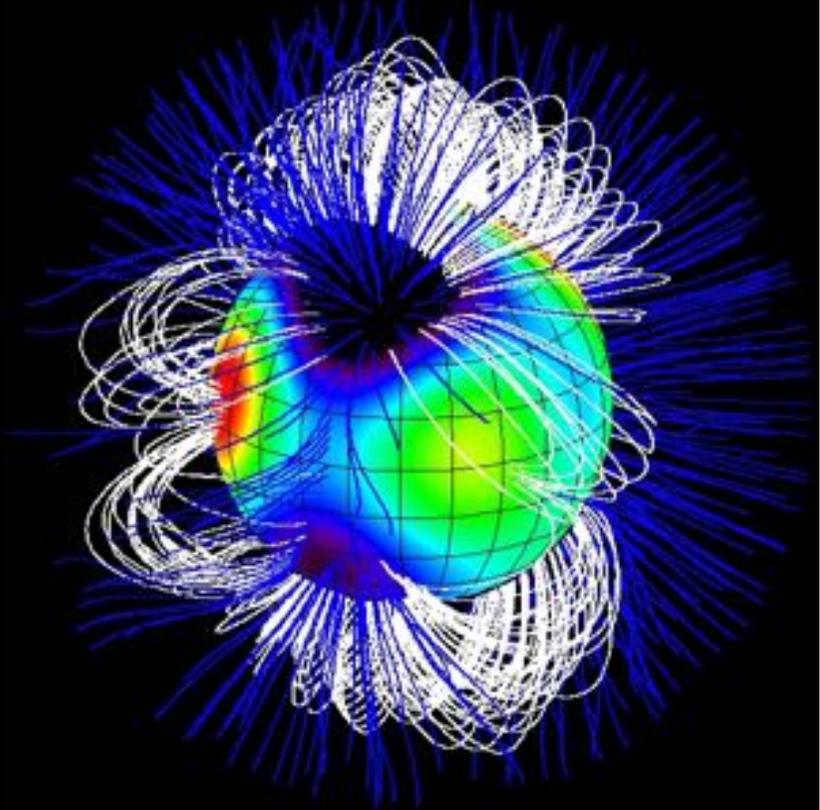
L'observateur ne résout pas le disque stellaire : il voit une seule raie, superposition des contributions de chaque point de la surface. Cette raie est élargie par rapport à la même étoile sans rotation.

Mesurer le champ magnétique

- Soleil : le magnétisme est étudié à partir des taches solaires (champ à petite échelle), des éruptions coronales (champ à plus grande échelle), etc.
- Autres étoiles : spectroscopie. En présence d'un champ magnétique, les raies spectrales se divisent en plusieurs composantes (effet Zeeman).



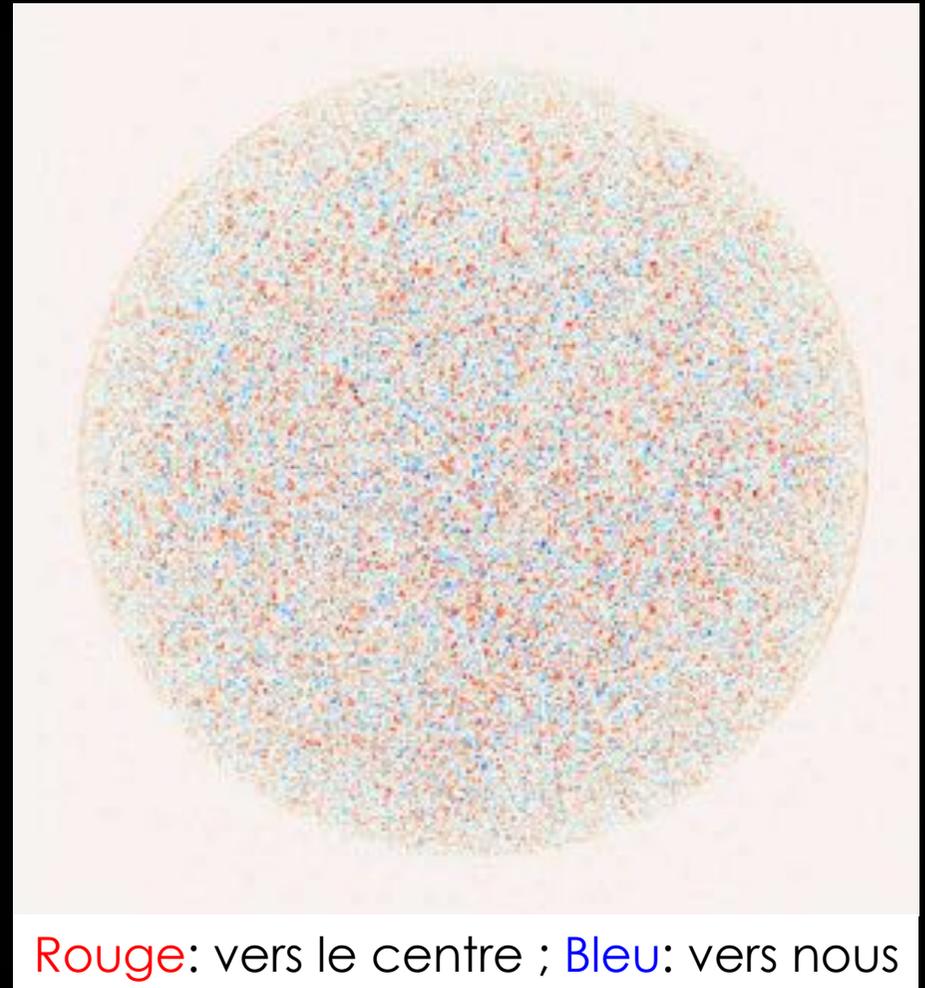
Séparation d'une raie en trois composantes par effet Zeeman au niveau d'une tache solaire (première observation par G.E. Hale en 1919)



Le champ magnétique reconstitué de l'étoile τ Scorpii à l'aide des mesures spectroscopiques de l'effet Zeeman-Doppler (spectrographe ESPaDONs au CFHT)

Sonder la structure interne

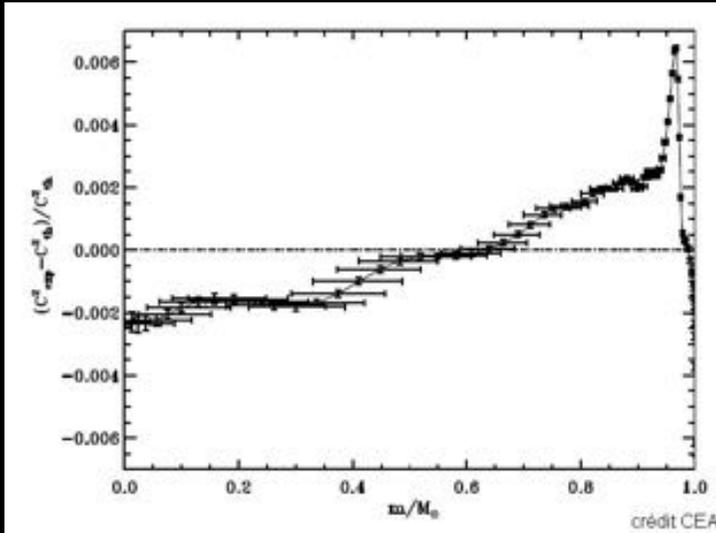
A la fin du XX^e siècle, les progrès de l'héliosismologie (étude des vibrations du Soleil) ont permis de mesurer la structure interne du Soleil et de confirmer et affiner le modèle théorique.



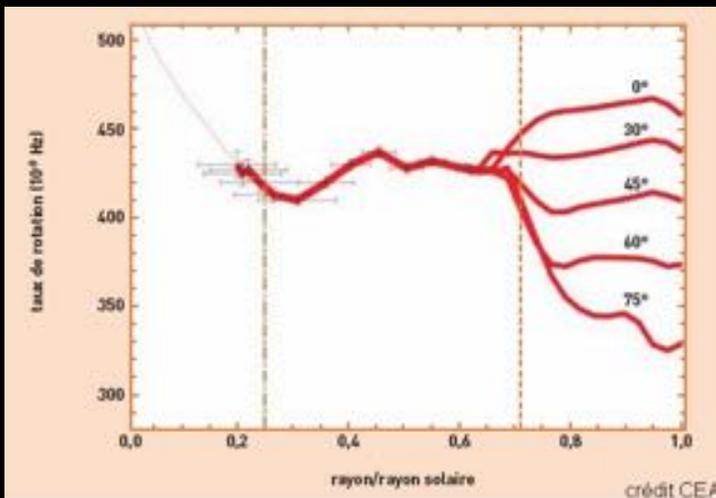
Rouge: vers le centre ; Bleu: vers nous

Sonder la structure interne

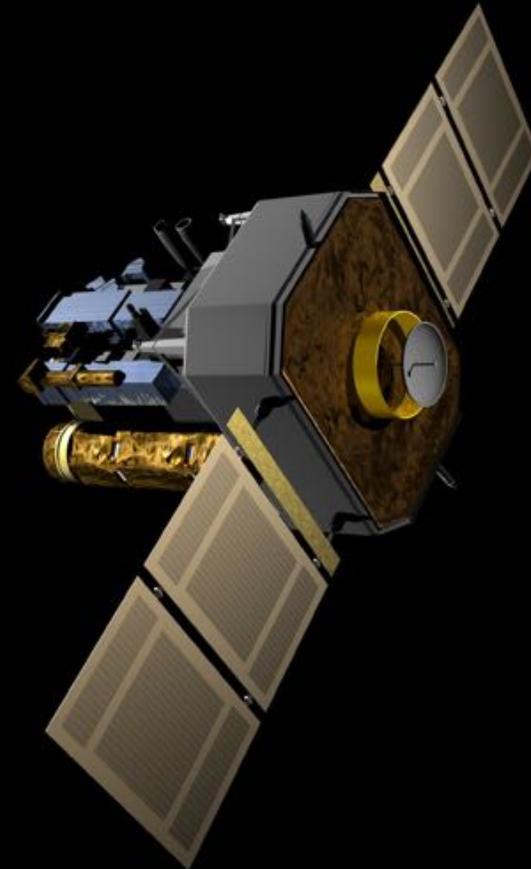
A la fin du XX^e siècle, les progrès de l'héliosismologie (étude des vibrations du Soleil) ont permis de mesurer la structure interne du Soleil et de confirmer et affiner le modèle théorique.



Vitesse du son dans le Soleil
Observations vs Modèle



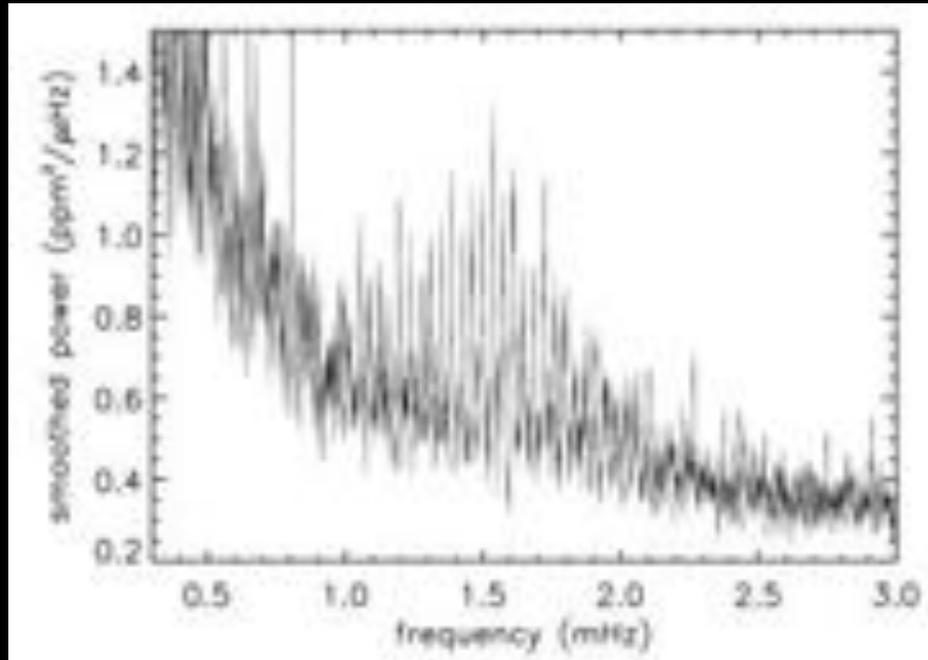
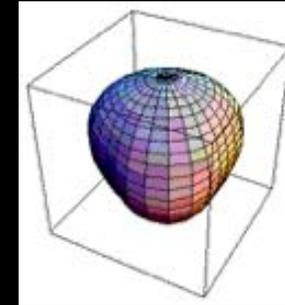
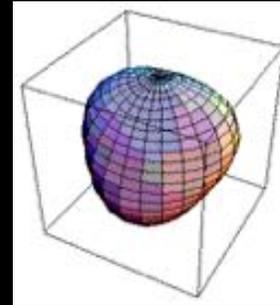
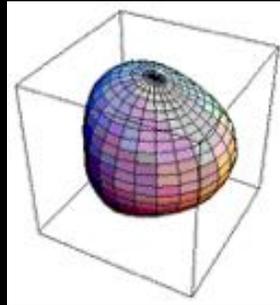
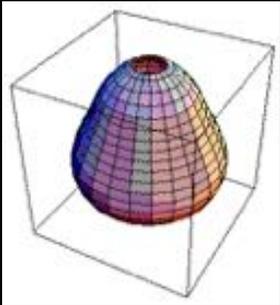
Vitesse de rotation du Soleil



Sonde SOHO (ESA,NASA) lancée en 1995
12 instruments pour observer le
Soleil, et en particulier ses oscillations.

Sonder la structure interne

La même technique peut être appliquée aux autres étoiles : l'astérosismologie. Cependant, on ne résout pas le disque : il faut mesurer la variabilité temporelle de la luminosité totale de l'étoile, pour identifier les fréquences d'oscillation.



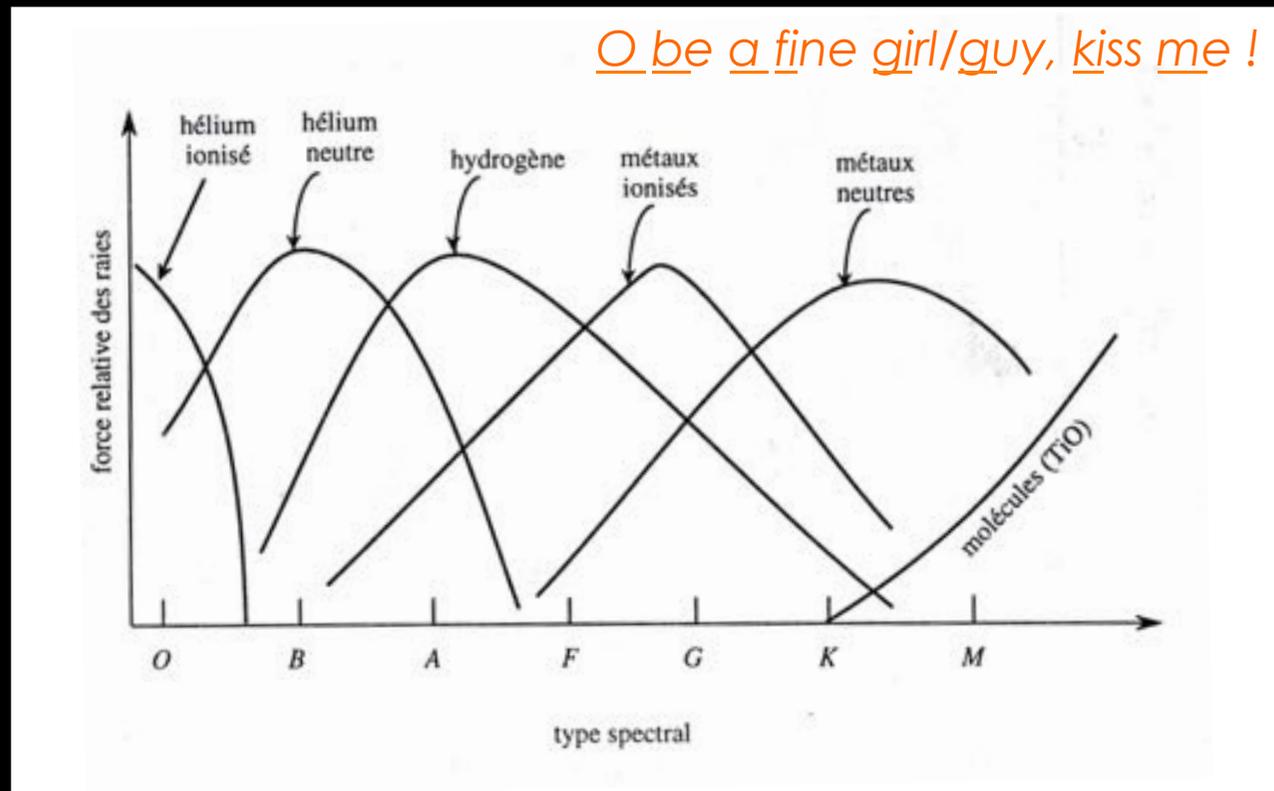
Identification des fréquences d'oscillation pour une étoile de type solaire.



Classer les étoiles

A partir du XIX^{ème} siècle, comme les mesures des propriétés physiques des étoiles devenaient possibles, le besoin est apparu d'organiser un classement, afin d'essayer de comprendre la diversité observée.

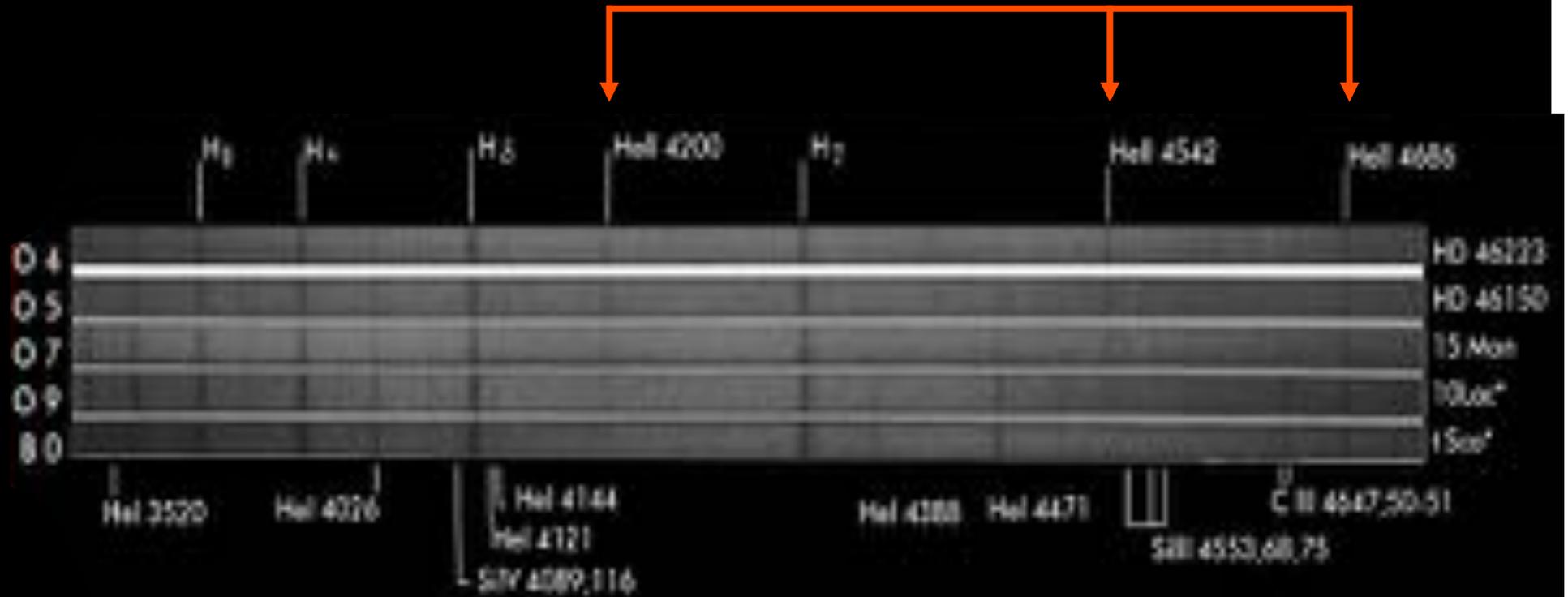
Le classement proposé est fondé sur l'étude du spectre : on attribue à chaque étoile un *type spectral*, en fonction des raies observées dans le spectre.



On a vite remarqué que le type spectral était relié à la couleur et on a compris plus tard que le paramètre déterminant est la température de surface.

Type spectral

Les étoiles de type O sont caractérisées par les raies de l'hélium ionisé

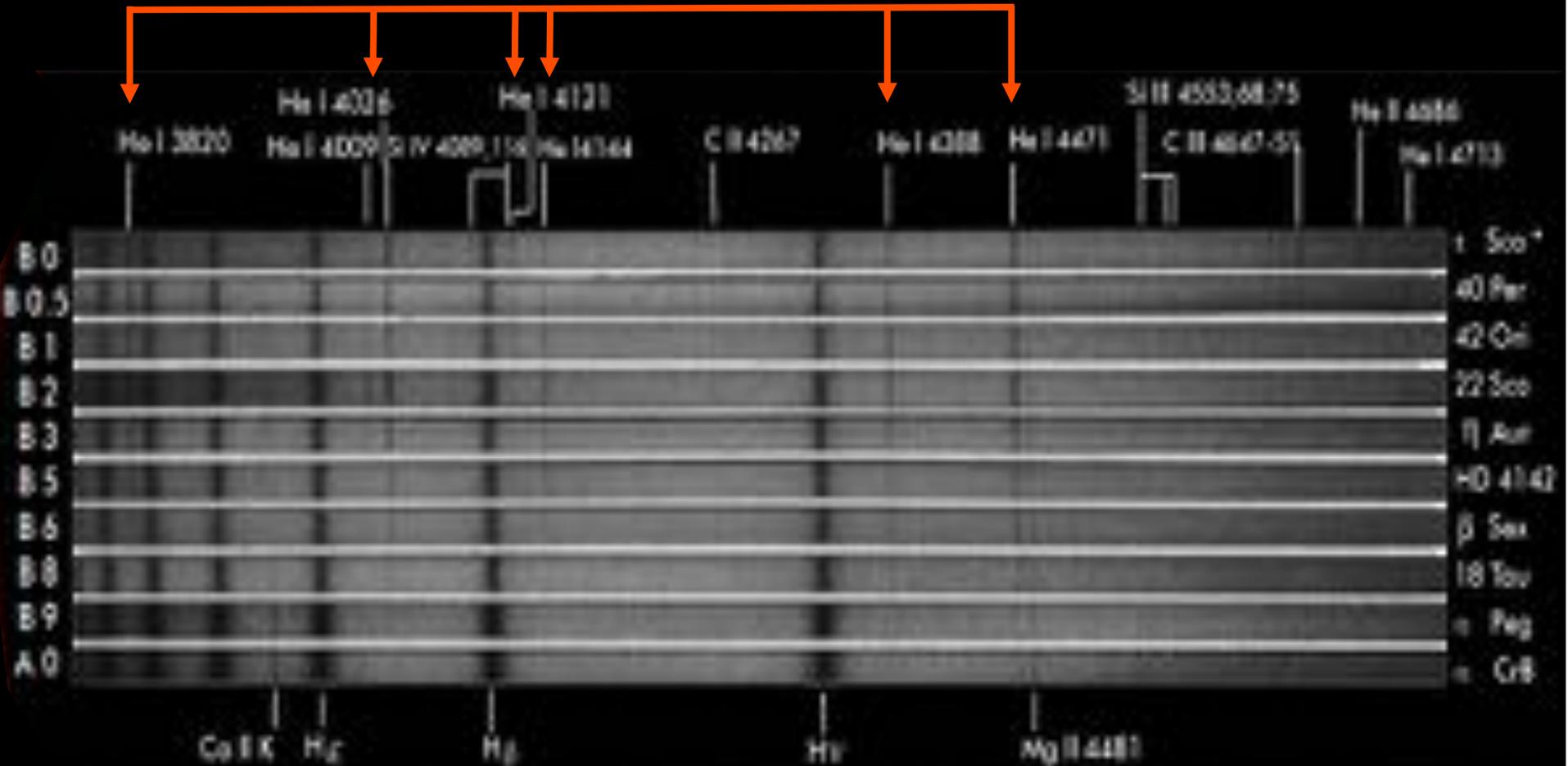


Ce sont des étoiles à température de surface très élevée (>25 000 K)

Ces étoiles sont de couleur bleue.

Type spectral

Les étoiles de type B sont caractérisées par les raies de l'hélium neutre

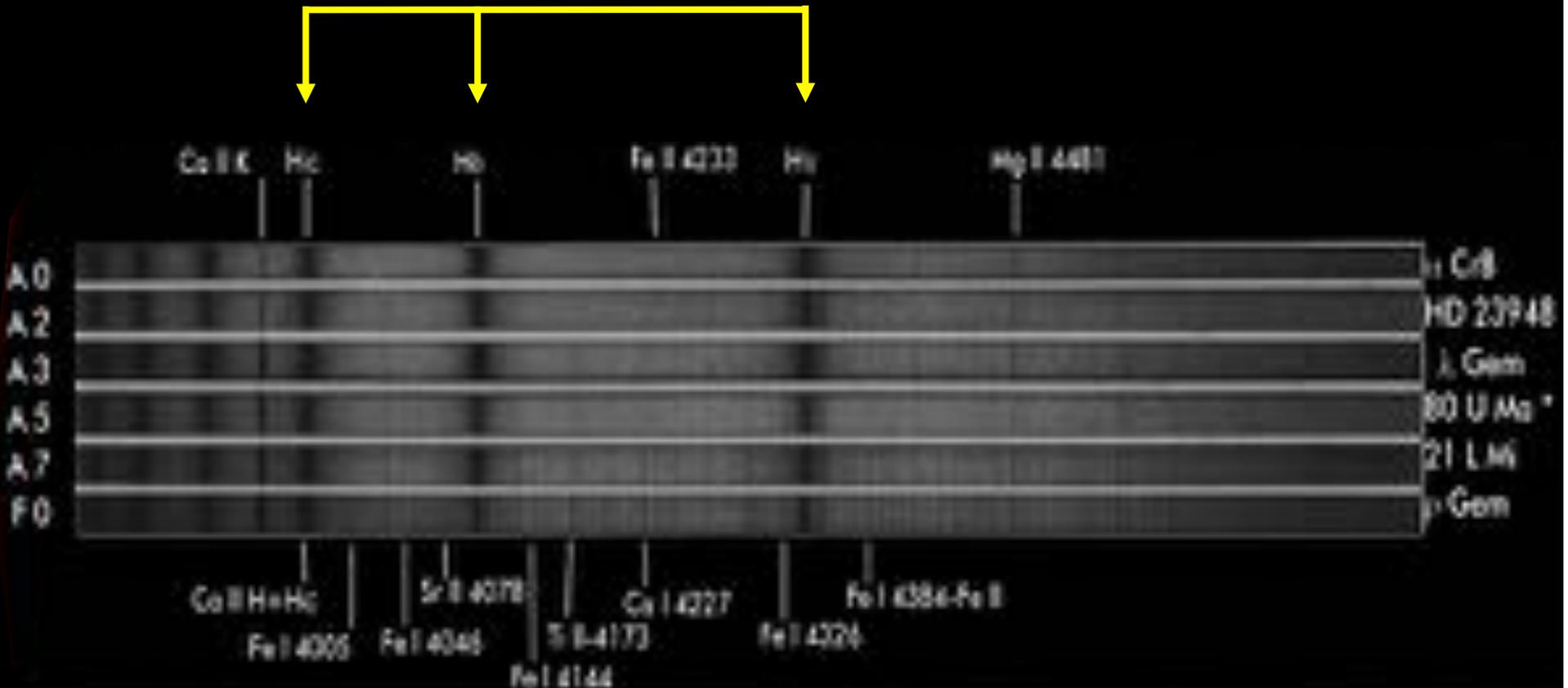


Ce sont des étoiles à température de surface élevée (10 000 - 25 000 K)

Ces étoiles sont de couleur bleue-blanche.

Type spectral

Les étoiles de type A sont caractérisées par les raies de l'hydrogène neutre

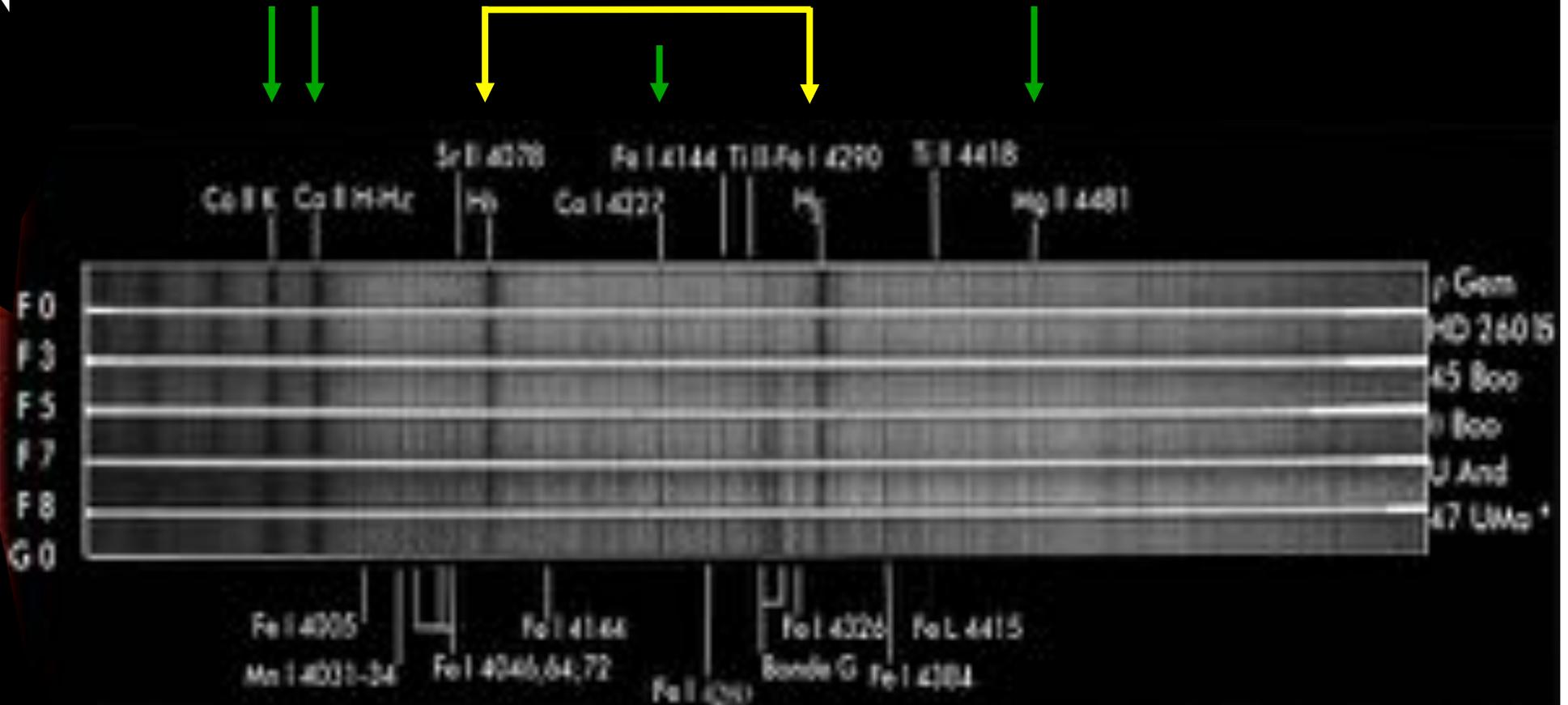


Ce sont des étoiles à température de surface modérée (7 500 - 10 000 K)

Ces étoiles sont de couleur blanche.

Type spectral

Le type F est caractérisé par les raies de l'hydrogène et de « métaux »

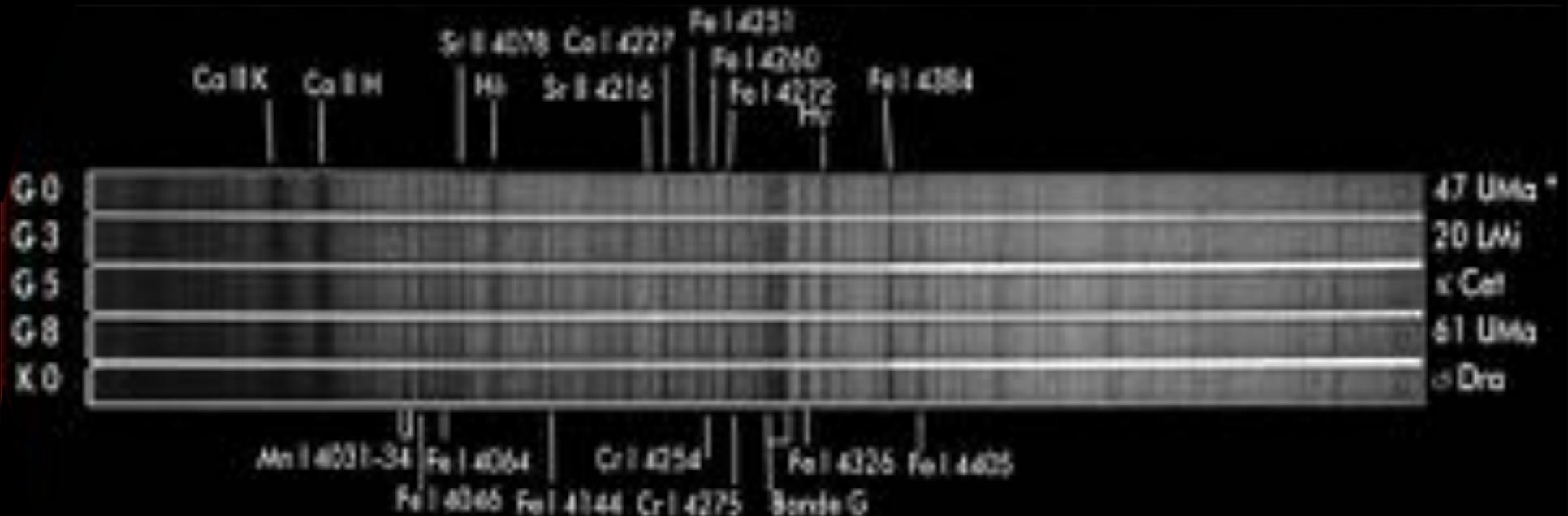


Ce sont des étoiles à température de surface modérée (6 000 - 7 500 K)

Ces étoiles sont de couleur jaune-blanche.

Type spectral

Le type G est caractérisé par des raies métalliques

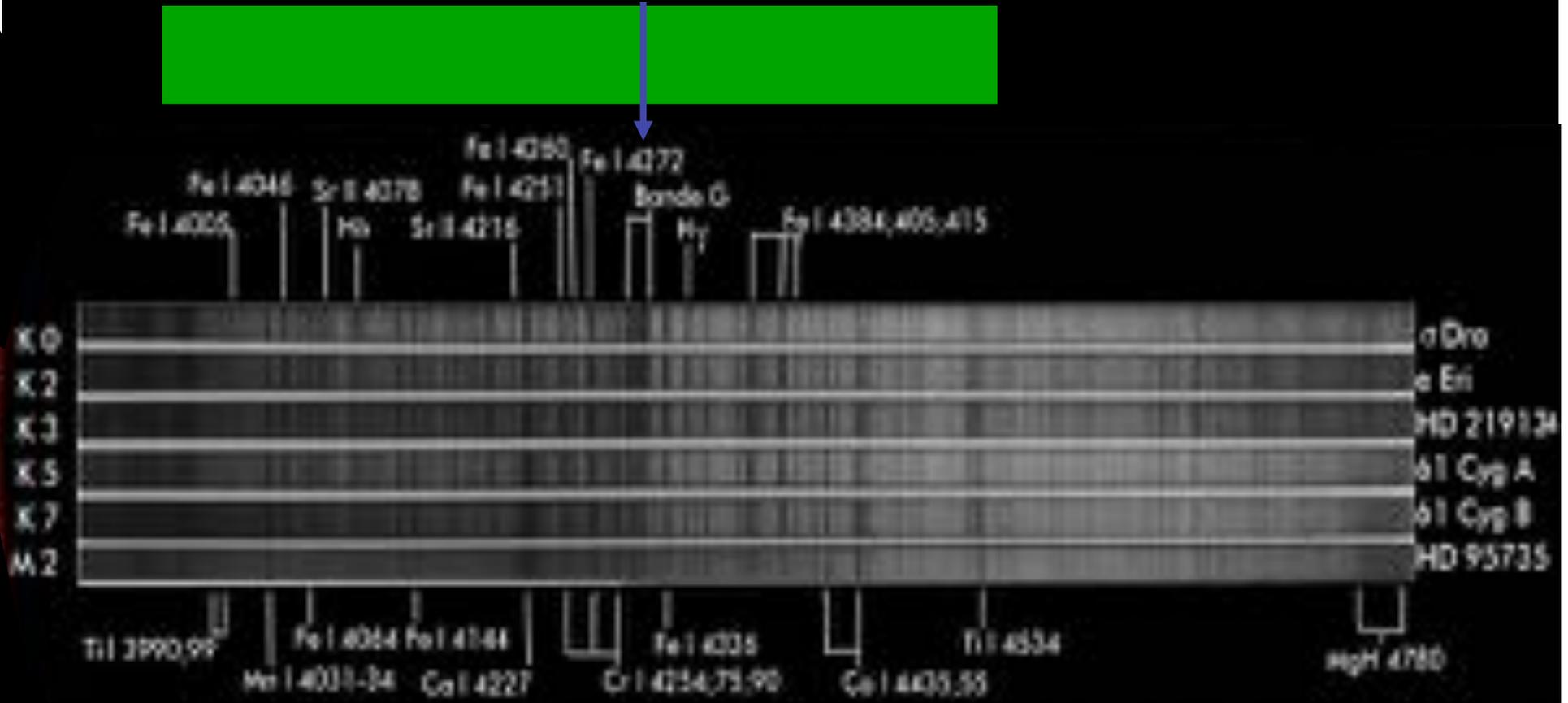


Ce sont des étoiles à température de surface modérée (5 000 - 6 000 K)

Ces étoiles sont de couleur jaune. Le Soleil est une étoile de type G.

Type spectral

Les types K et M sont caractérisés par des raies métalliques et moléculaires



Ce sont des étoiles à température de surface faible
(type K : 3 500 - 5 000 K ; type M < 3 500 K)

Ces étoiles sont de couleur jaune-orange (type K) et rouge (type M).

Le début de la physique stellaire

En 1914, deux astronomes ont tracé pour la première fois un diagramme qui porte désormais leur nom : le diagramme de Hertzsprung-Russell (HR).



Ejnar Hertzsprung
(1873-1967)



Henri Norris Russell
(1877-1957)

Luminosité
(magnitude
absolue)

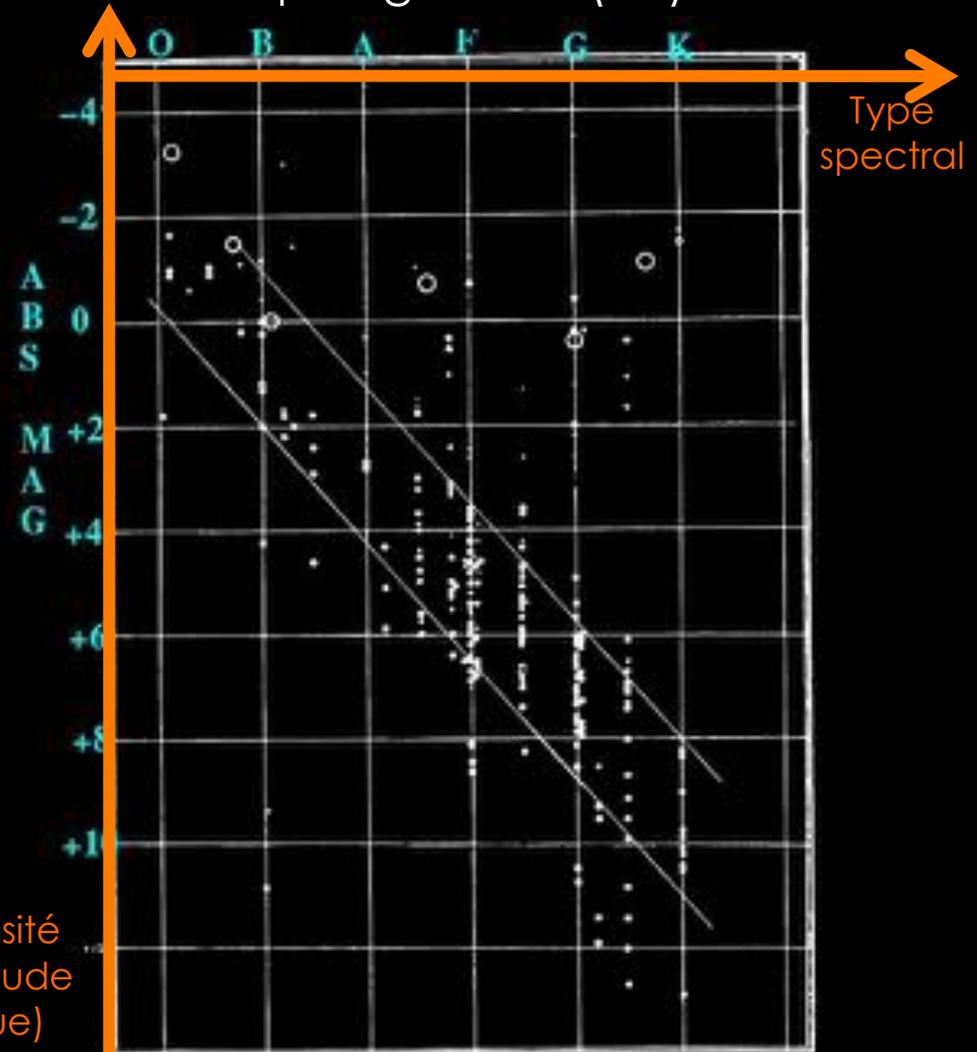
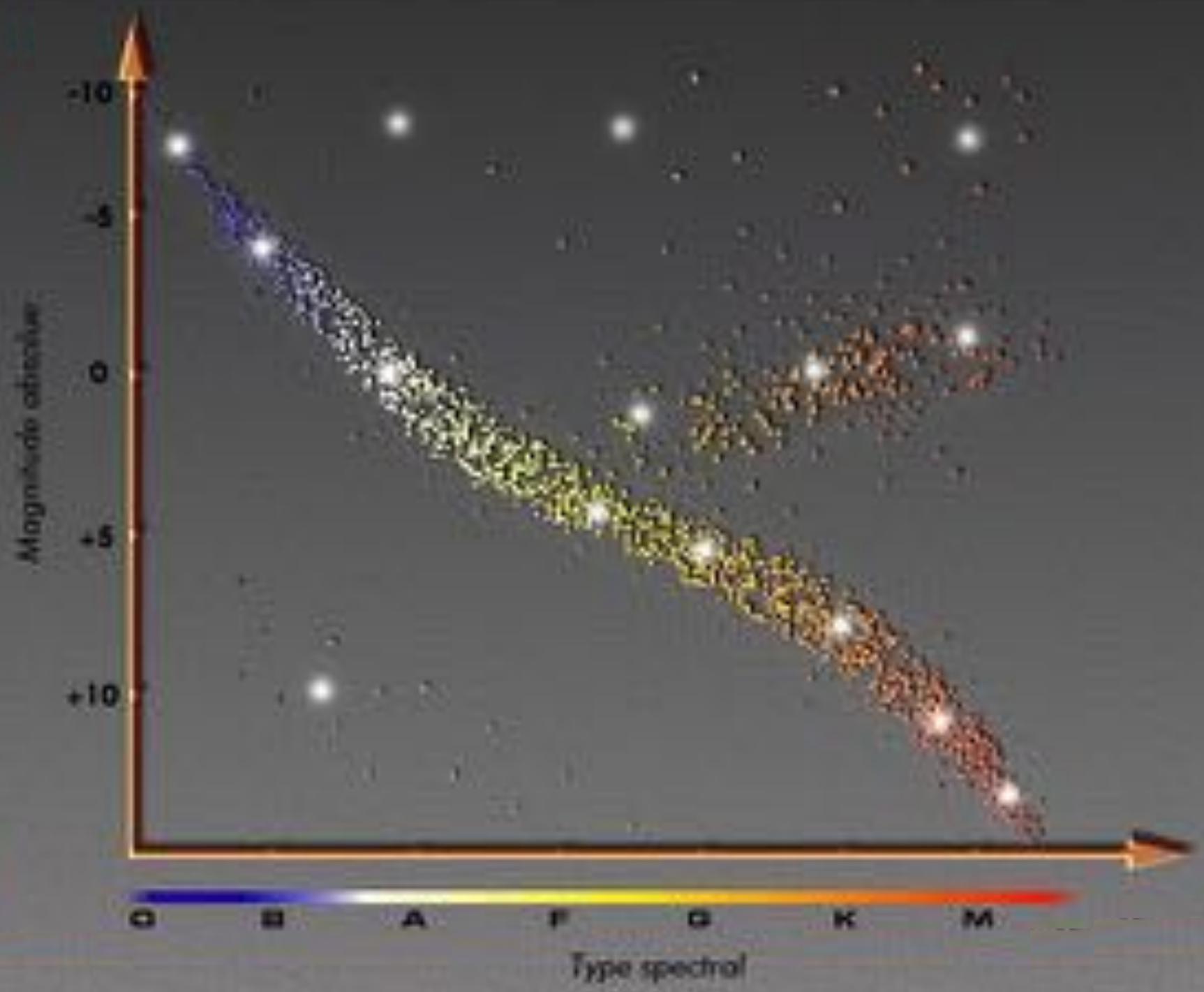
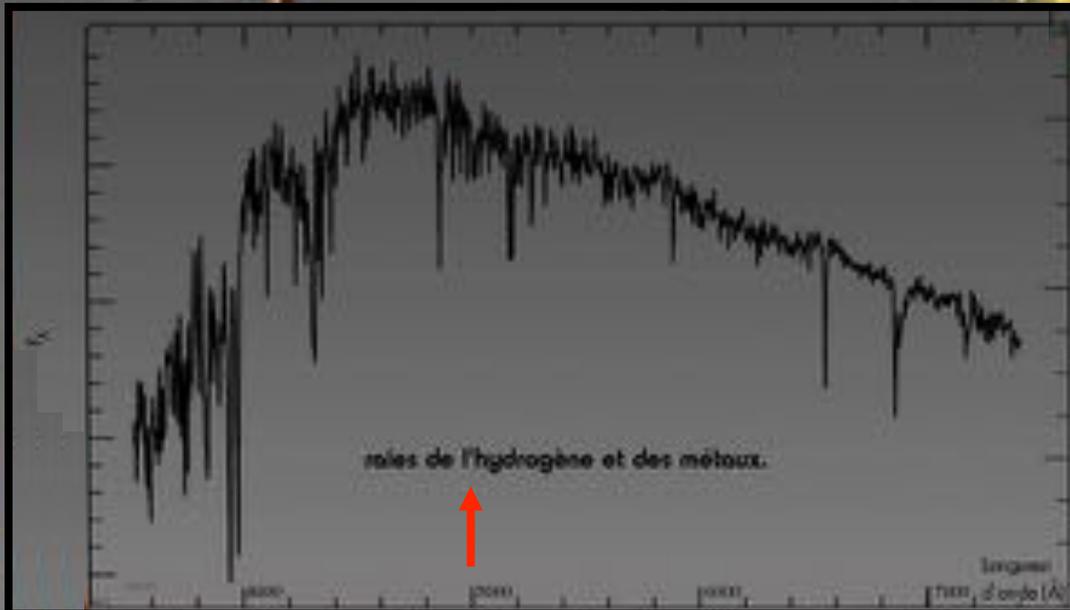


Figure 8.10 Henry Norris Russell's first diagram, with spectral types listed along the top and absolute magnitudes on the left-hand side. (Figure from Russell, *Nature*, 93, 252, 1914.)



Séquence principale : étoile G

Nom	Soleil, α Cen A (G2V)
Masse	$1 M_{\odot}$
Luminosité	$1 L_{\odot}$
Rayon	$1 R_{\odot}$
Température effective	5 800 K



Séquence principale : étoile O

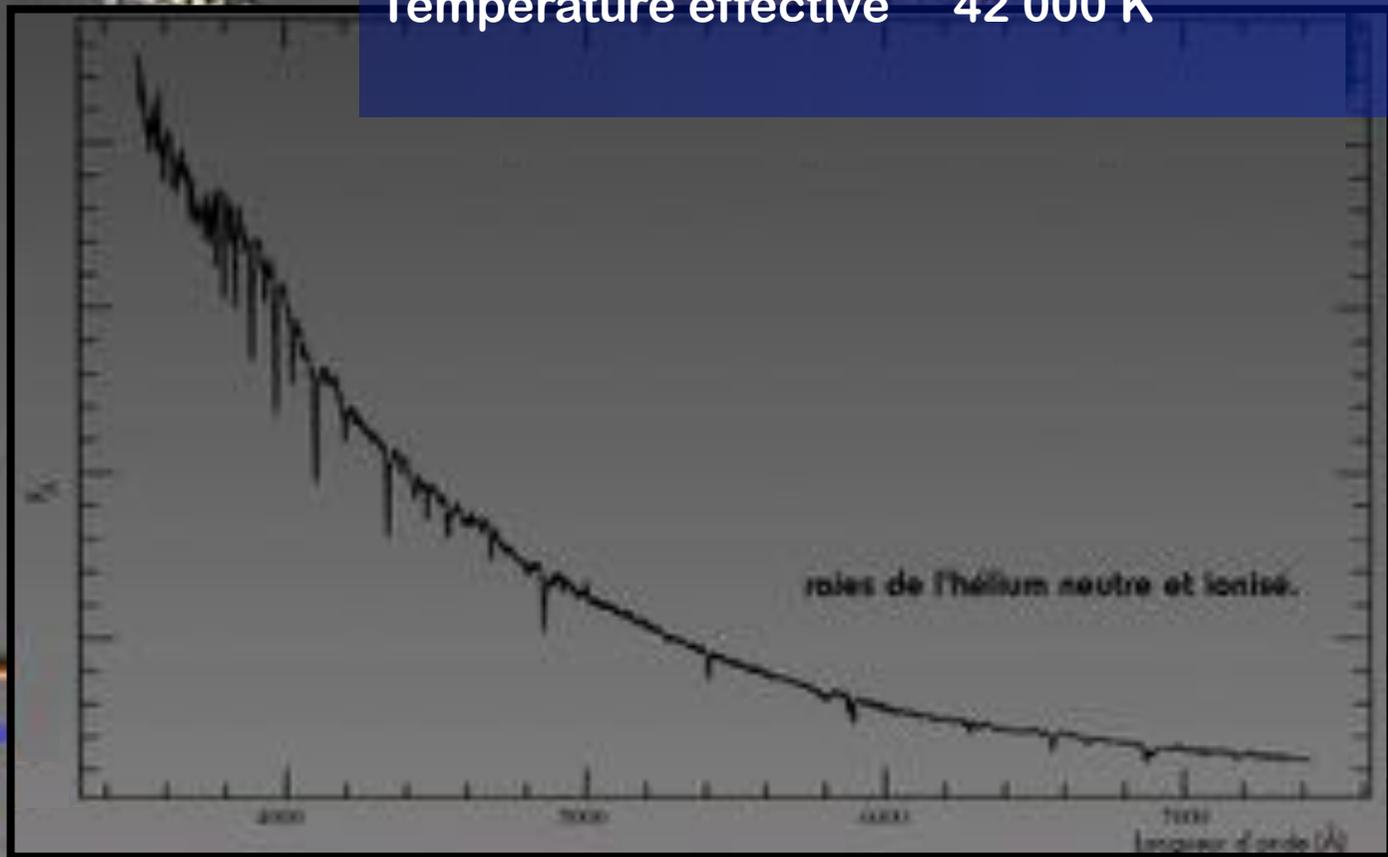
Nom HD199579 (O6V)

Masse $50 M_{\odot}$

Luminosité $40\,000 L_{\odot}$

Rayon $12 R_{\odot}$

Température effective $42\,000\text{ K}$



Séquence principale : étoile M

Nom Ross 128 (M5V)

Masse $0,2 M_{\odot}$

Luminosité $0,011 L_{\odot}$

Rayon $0,27 R_{\odot}$

Température effective 3 240 K



Géante rouge de type M

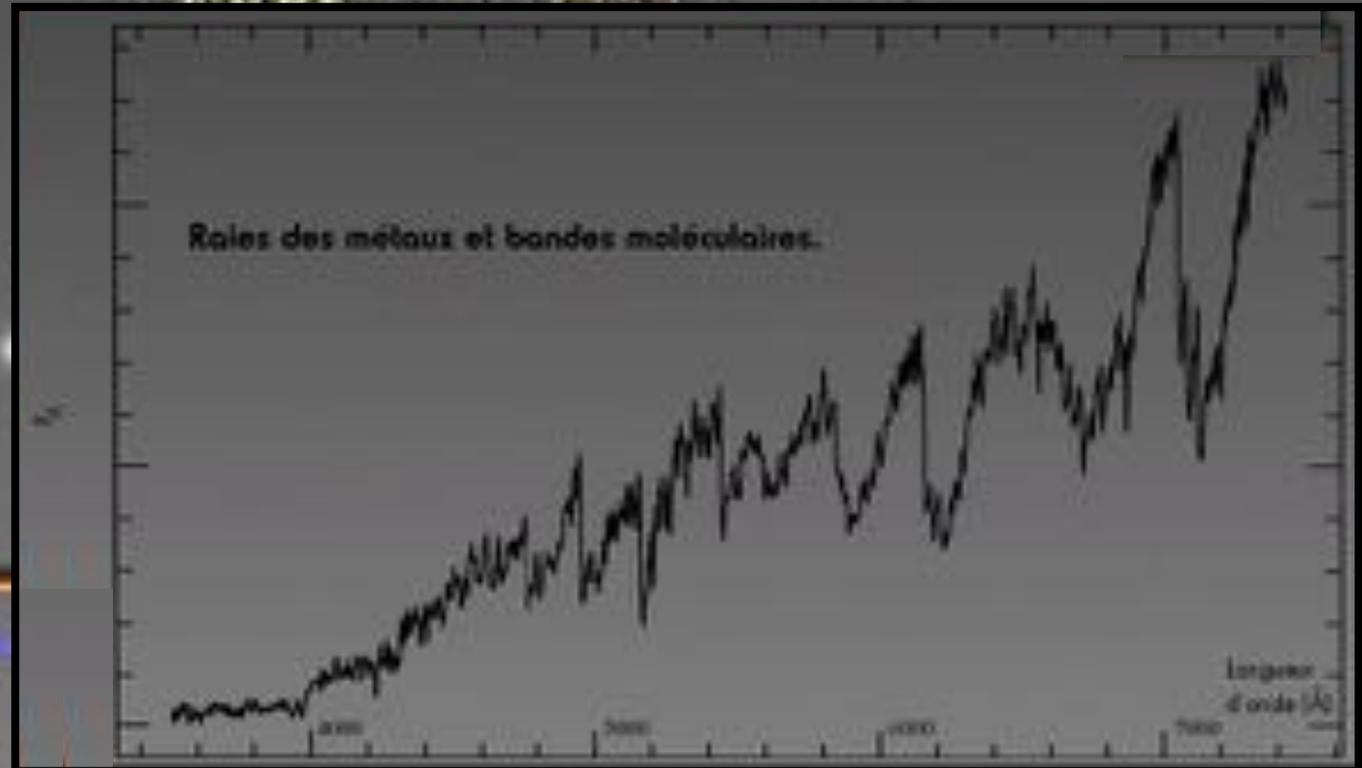
Nom γ Hyi (M2 III)

Masse $1,3 M_{\odot}$

Luminosité $550 L_{\odot}$

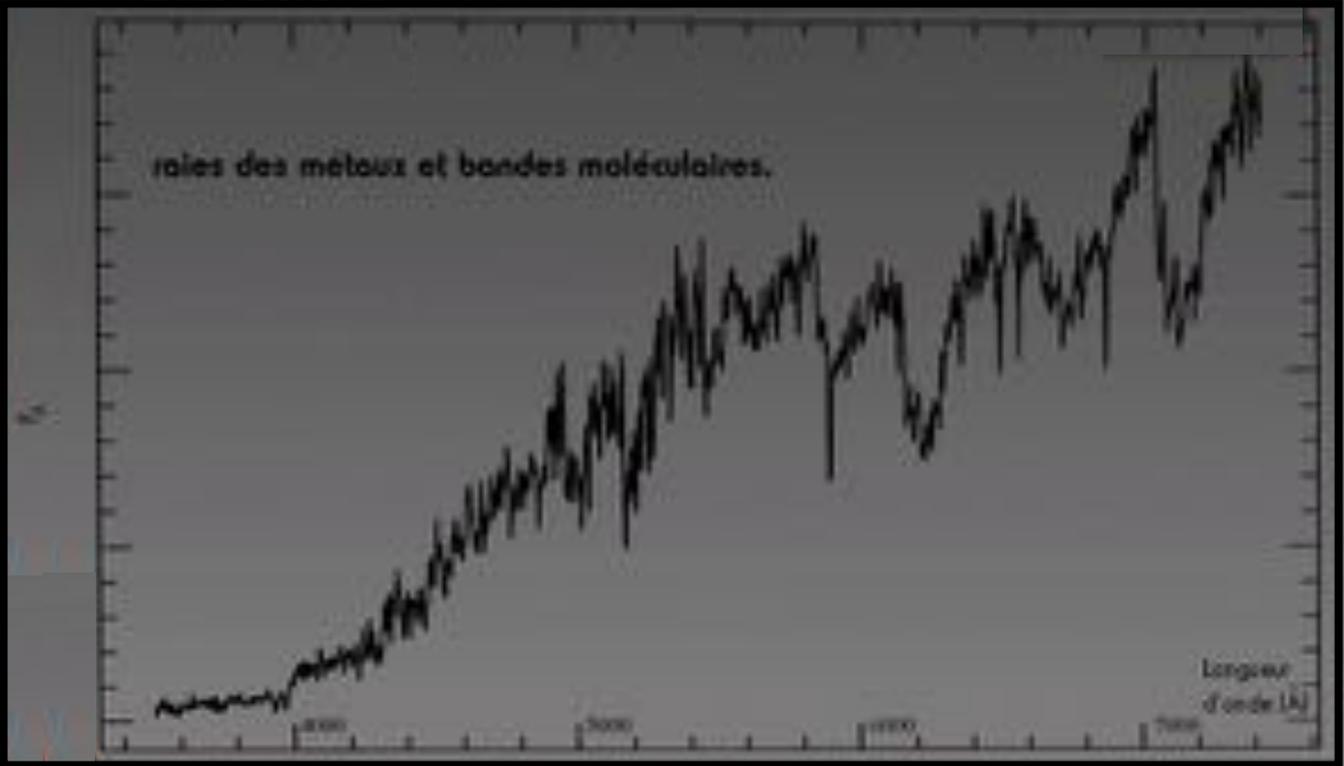
Rayon $65 R_{\odot}$

Température effective 3 500 K



Super-géante rouge de type M

Nom	α Ori 'Betelgeuse' (M2 I)
Masse	20 M_{\odot}
Luminosité	55 000 L_{\odot}
Rayon	400 R_{\odot}
Température effective	3 000 K



Super-géante bleue de type B

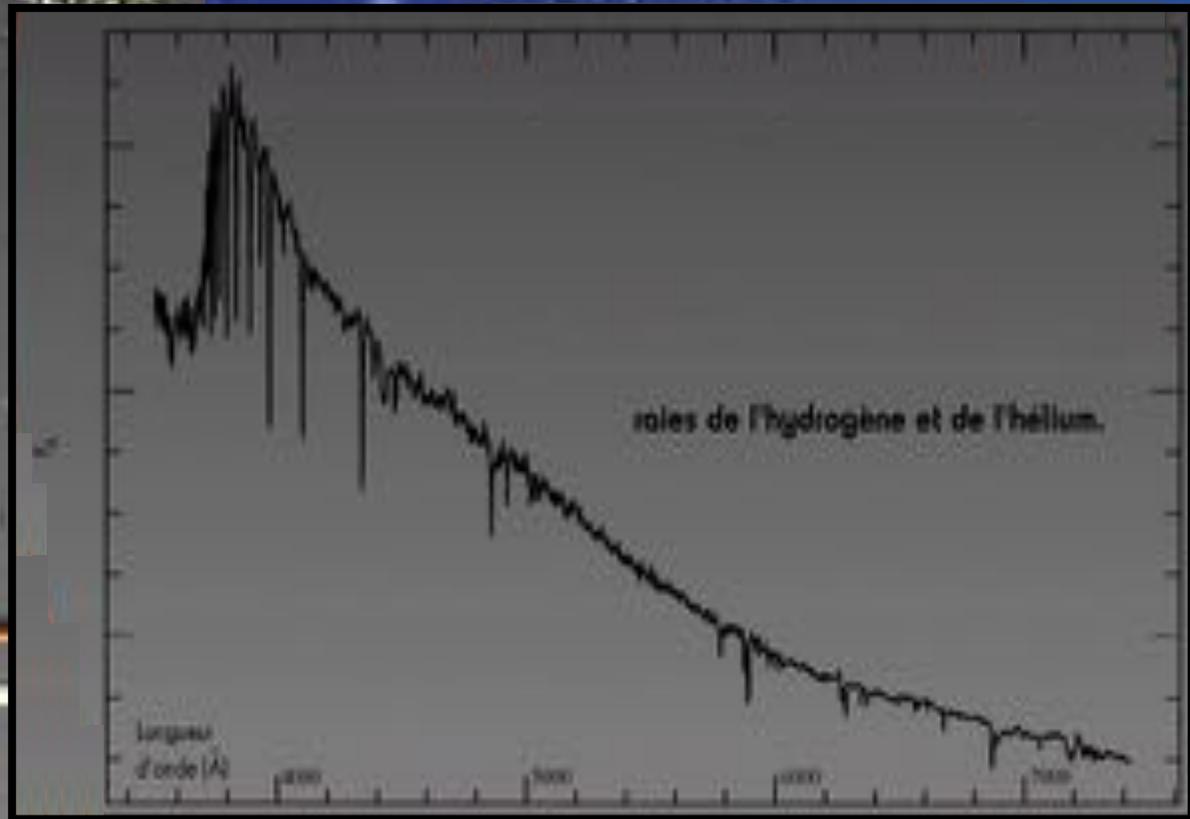
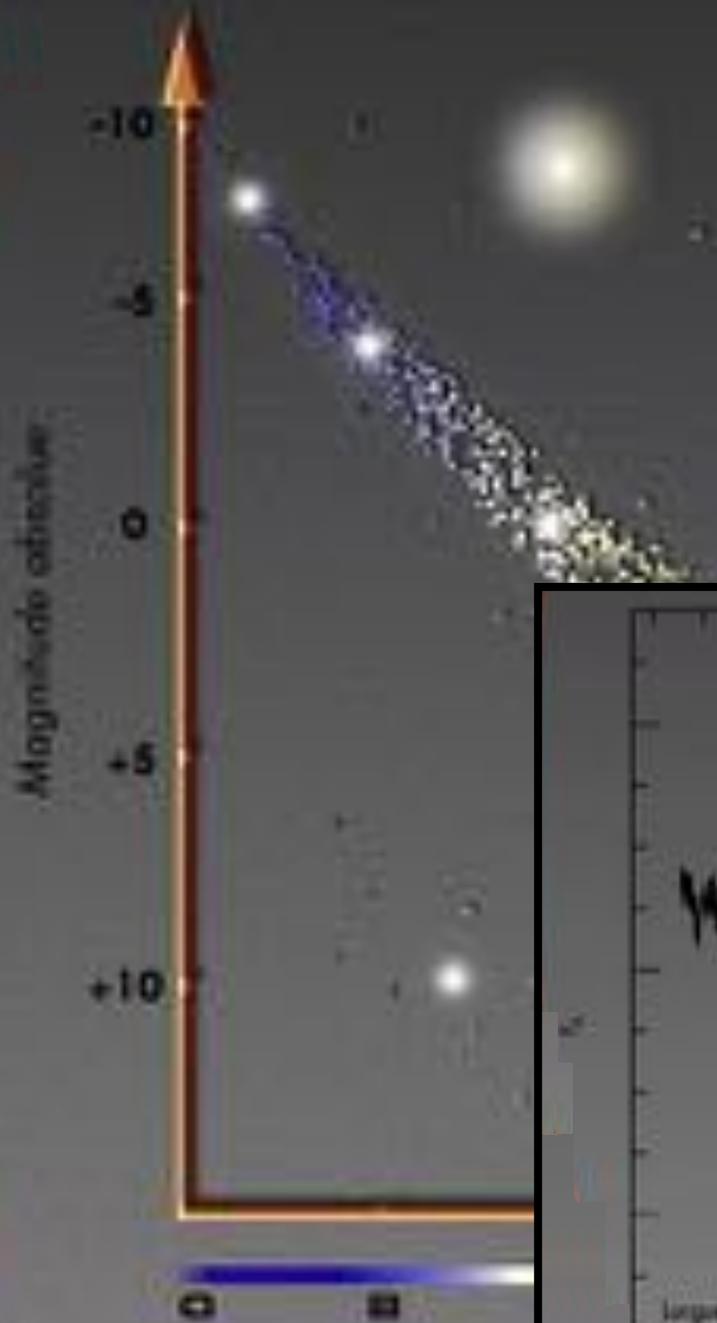
Nom β Ori 'Rigel' (B8 I)

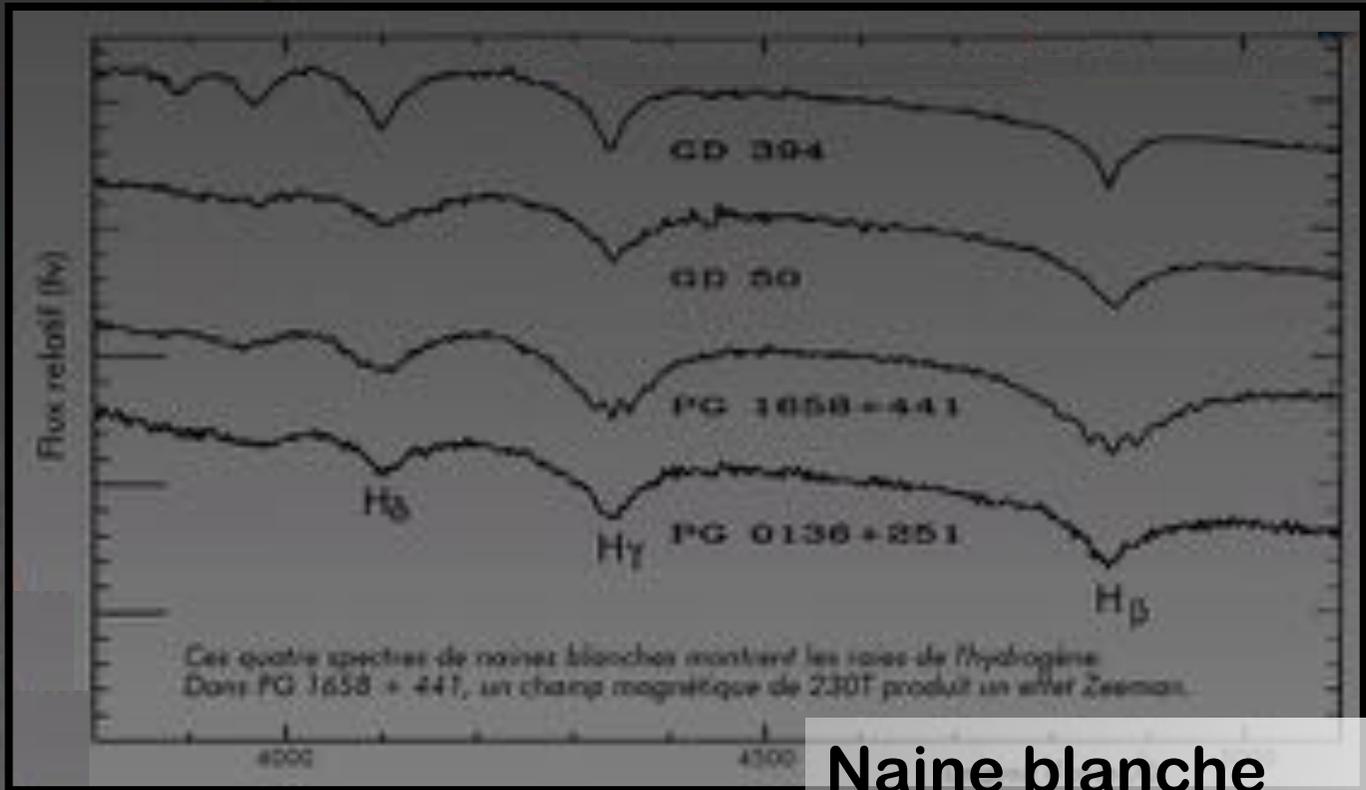
Masse $18 M_{\odot}$

Luminosité $40\,000 L_{\odot}$

Rayon $56 R_{\odot}$

Température effective $11\,000\text{ K}$





Naine blanche

Nom	Sirius B
Masse	1,05 M _☉
Luminosité	0,028 L _☉
Rayon	5 500 km
Température effective	27 000 K



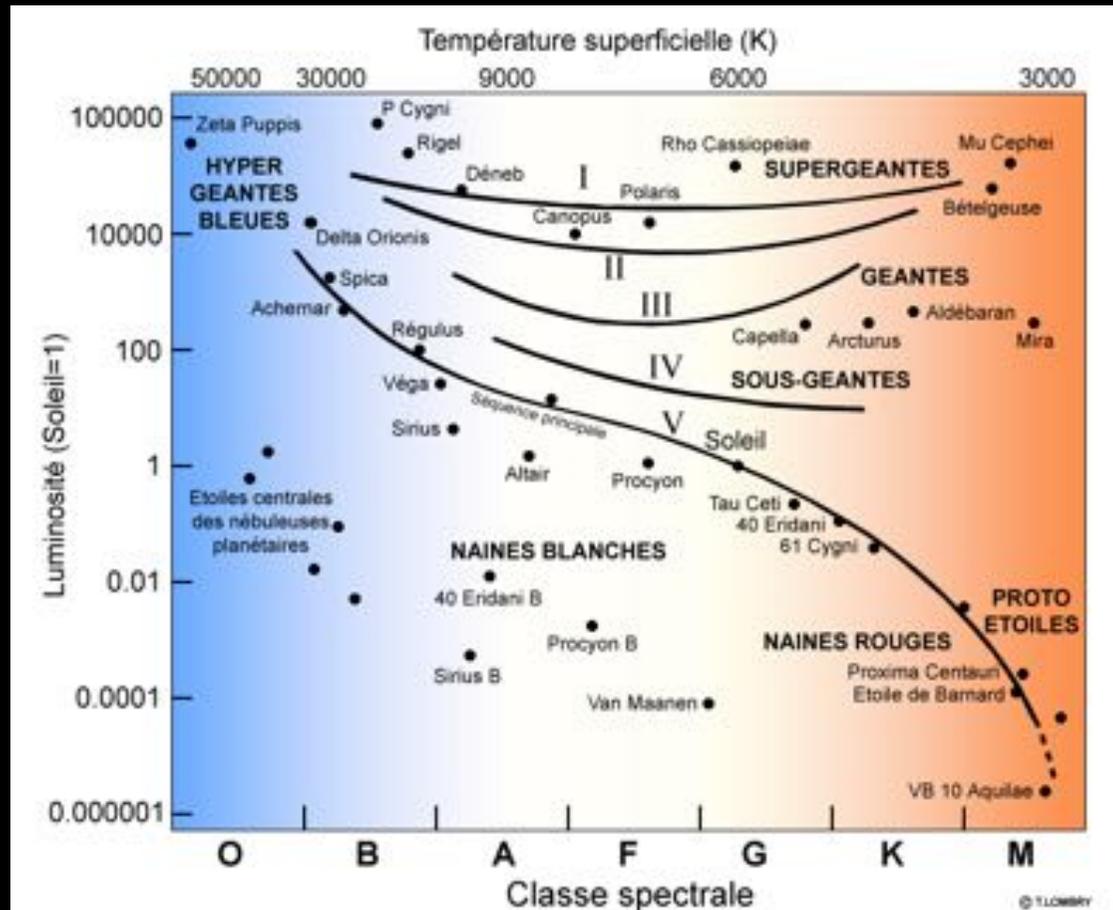
Type spectral

Le diagramme HR

- Le diagramme HR montre que le *type spectral* ne suffit pas pour classer les étoiles. Ainsi, une naine rouge, une géante rouge, et une super-géante rouge de type M ont le même type spectral mais sont très différentes
- Il faut une seconde information : la luminosité (on définit les classes I, II, III, IV, ...)
- Type spectral + classe de luminosité donnent le lieu dans le diagramme HR
- Le Soleil est une étoile G-V

▪ Toutes les régions du diagramme HR ne sont pas remplies de manière identiques :

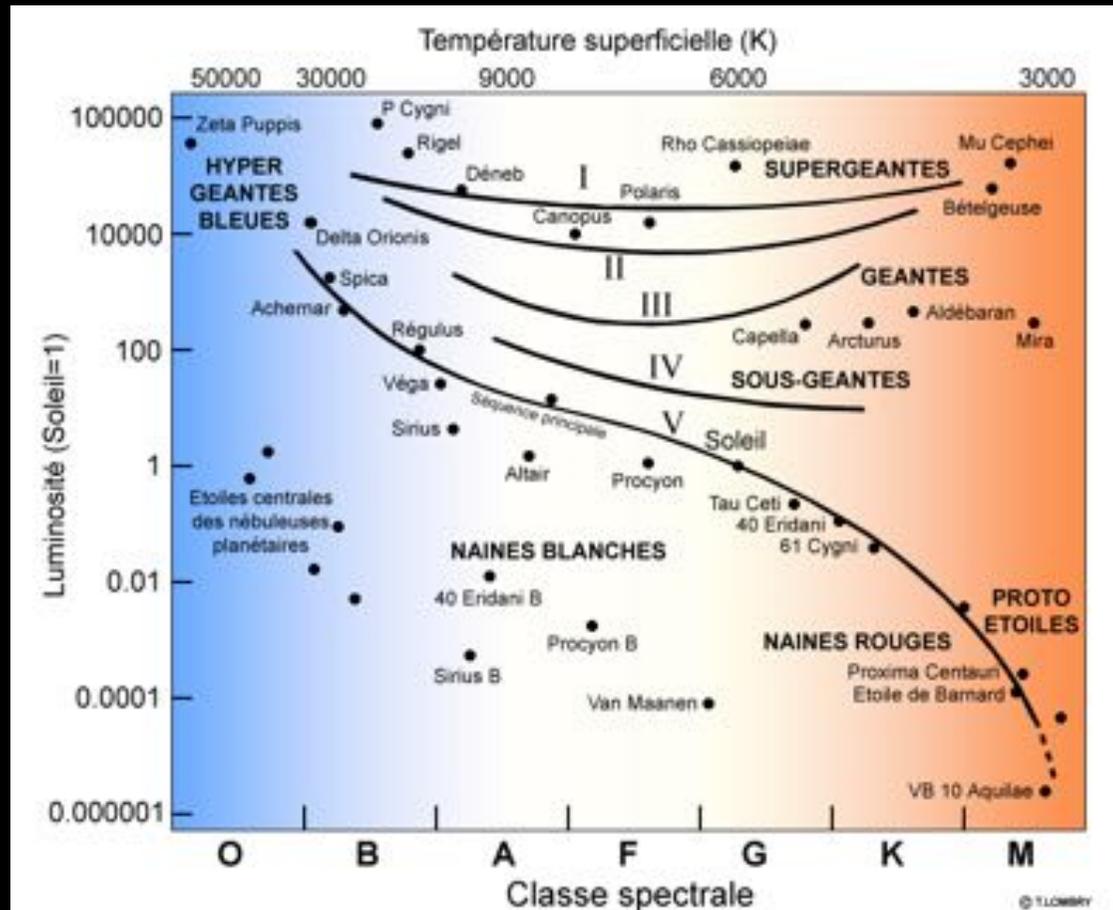
- La majorité des étoiles sont sur la séquence principale
- D'autres régions contiennent peu (géantes) ou très peu (supergéantes) d'étoiles.
- Il y a des régions vides...



Le diagramme HR

- La découverte fondamentale contenue dans le diagramme HR, c'est que les étoiles ne s'y répartissent pas au hasard.
- Cette organisation des étoiles indique une logique sous-jacente, que les astrophysiciens peuvent espérer comprendre, grâce aux lois de la Physique.
- Le diagramme HR va permettre de comprendre deux aspects:

- la structure des étoiles
- leur évolution



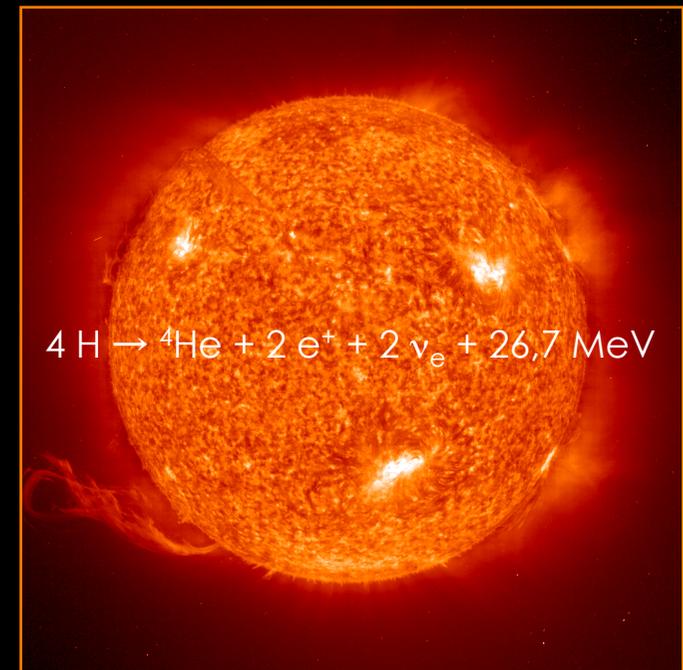
La physique des étoiles

Comprendre la physique des étoiles est un défi majeur. Ce n'est qu'à partir du milieu du XX^e siècle que des étapes significatives ont été franchies. Aujourd'hui, même si certains détails (structure 3D, rotation différentielle, couronne, ...) posent encore problème, l'essentiel est compris.

Pourquoi est-ce si difficile ?

-Théorie : la physique stellaire fait appel à de nombreuses branches de la physique, dont certaines n'ont été identifiées qu'au XX^e siècle.

Mécanique des fluides,
Gravitation,
Physique nucléaire,
Transport de la chaleur,
Transport du rayonnement,
Equation d'état de la matière,
etc.



La physique des étoiles

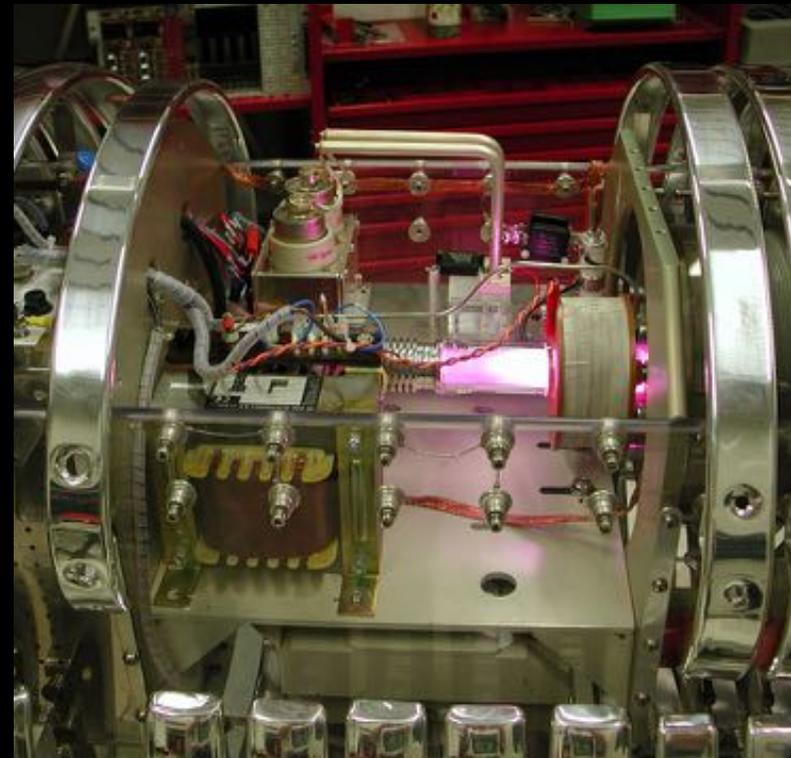
Comprendre la physique des étoiles est un défi majeur. Ce n'est qu'à partir du milieu du XX^e siècle que des étapes significatives ont été franchies. Aujourd'hui, même si certains détails (structure 3D, rotation différentielle, couronne, ...) posent encore problème, l'essentiel est compris.

Pourquoi est-ce si difficile ?

- Théorie

- Données expérimentales : même une fois la théorie physique identifiée, l'application aux étoiles nécessite des mesures expérimentales difficiles.

Opacités,
Sections efficaces nucléaires,
etc.

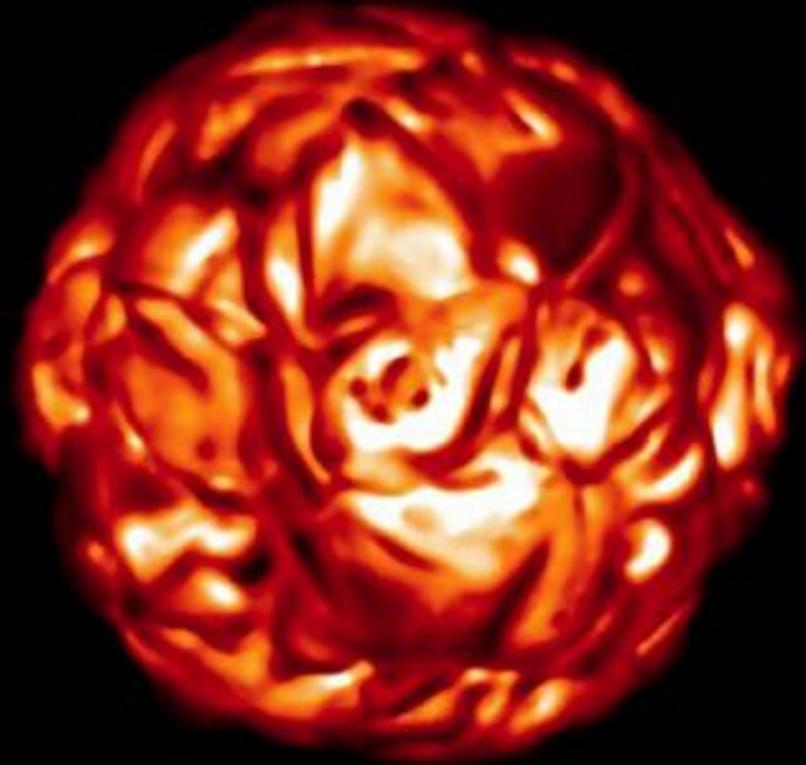


La physique des étoiles

Comprendre la physique des étoiles est un défi majeur. Ce n'est qu'à partir du milieu du XX^e siècle que des étapes significatives ont été franchies. Aujourd'hui, même si certains détails (structure 3D, rotation différentielle, couronne, ...) posent encore problème, l'essentiel est compris.

Pourquoi est-ce si difficile ?

- Théorie
- Données expérimentales
- Simulation numérique : même avec une théorie bien établie et des données expérimentales précises, le système étoile est régi par un jeu d'équations mathématiques complexes, dont la résolution à *la main* est impossible, sauf dans des cas très simplifiés. Il a donc fallu attendre l'émergence de l'ordinateur...

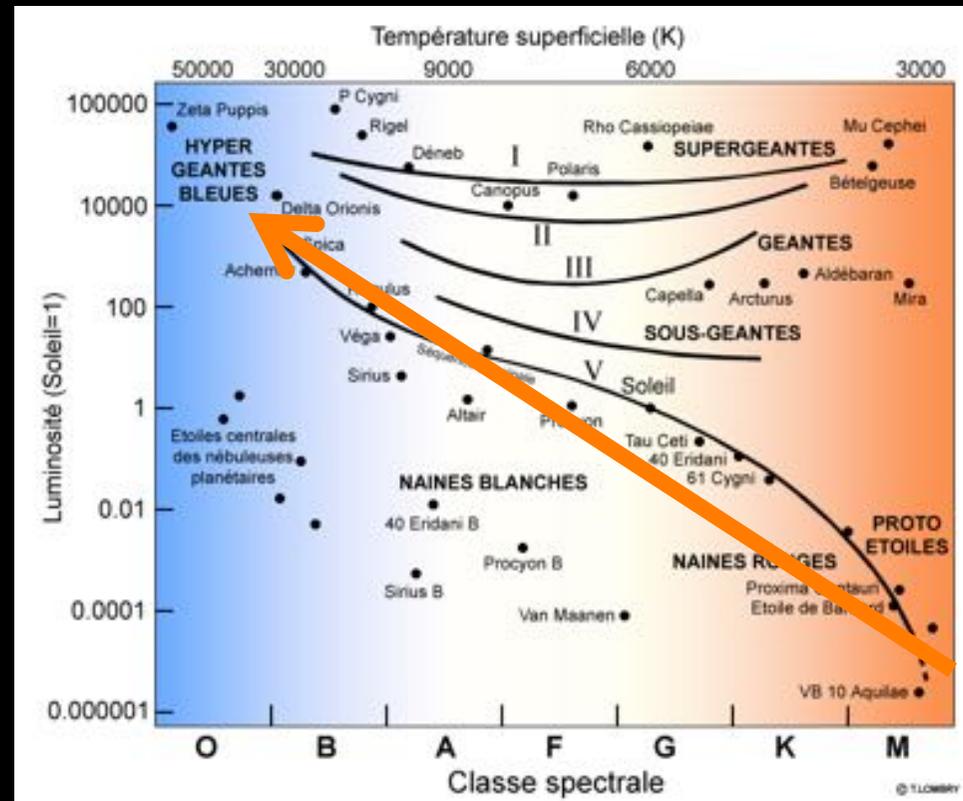


Simulation numérique de la convection sous la surface d'une étoile supergéante (GRAAL, Montpellier)

La physique des étoiles

Les obstacles ont été vaincus les uns après les autres. Aujourd'hui nous savons :

- Que les étoiles naissent sur la séquence principale
 - Que les étoiles de la séquence principale ont pour source d'énergie la fusion nucléaire de l'hydrogène en hélium en leur cœur (cf. cours n°2).
 - Que leur structure dépend de leur masse : quand la masse augmente, la structure évolue des naines rouges aux géantes bleues.



Effet de la masse

La physique des étoiles

Les obstacles ont été vaincus les uns après les autres. Aujourd'hui nous savons :

- Que les étoiles naissent sur la séquence principale
 - Que toutes les étoiles n'ont pas la même durée de vie sur la séquence principale. Comme les géantes bleues sont très lumineuses, elles brûlent plus vite leur carburant nucléaire (l'hydrogène du cœur)...
- Masse = $0.2 M_{\text{soleil}}$ (naine rouge) : ~1000 milliards d'années
 - Masse = $1 M_{\text{soleil}}$: ~10 milliards d'années
 - Masse = $10 M_{\text{soleil}}$ (géante bleue) : ~20 millions d'années



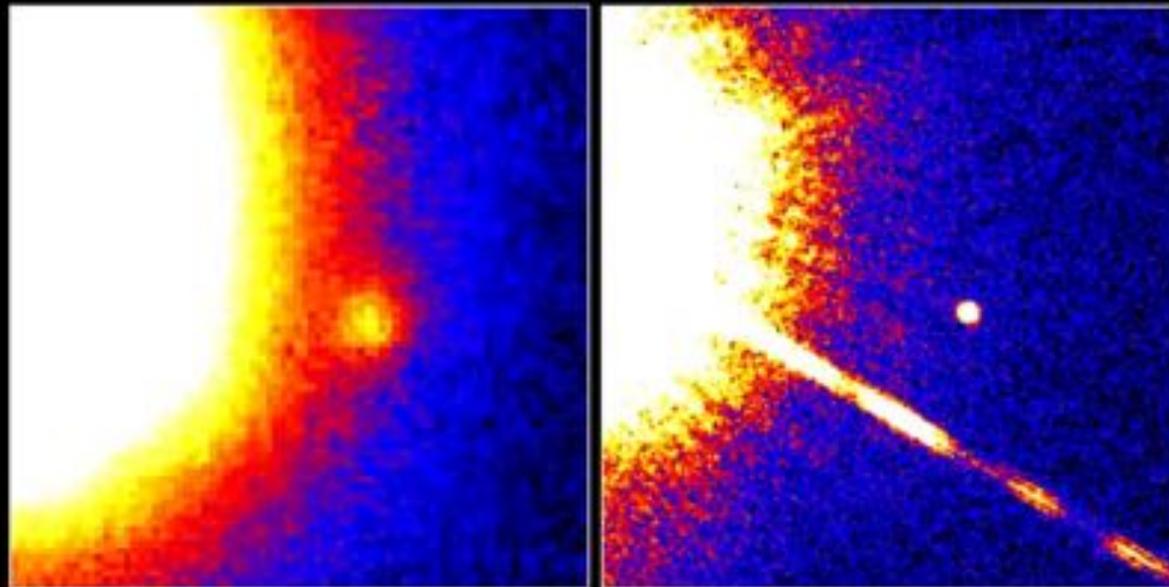
L'amas ouvert des Pléiades

La physique des étoiles

Les obstacles ont été vaincus les uns après les autres. Aujourd'hui nous savons :

- Que les étoiles naissent sur la séquence principale
 - Qu'il y a une masse minimum pour former une étoile ($\sim 0,07 M_{\text{soleil}}$)
 - Que les étoiles massives deviennent de plus en plus instables
 - Qu'il y a donc une masse maximum pour les étoiles stables ($\sim 100 M_{\text{soleil}}$)

Brown Dwarf Gliese 229B



Palomar Observatory
Discovery Image
October 27, 1994

Hubble Space Telescope
Wide Field Planetary Camera 2
November 17, 1995

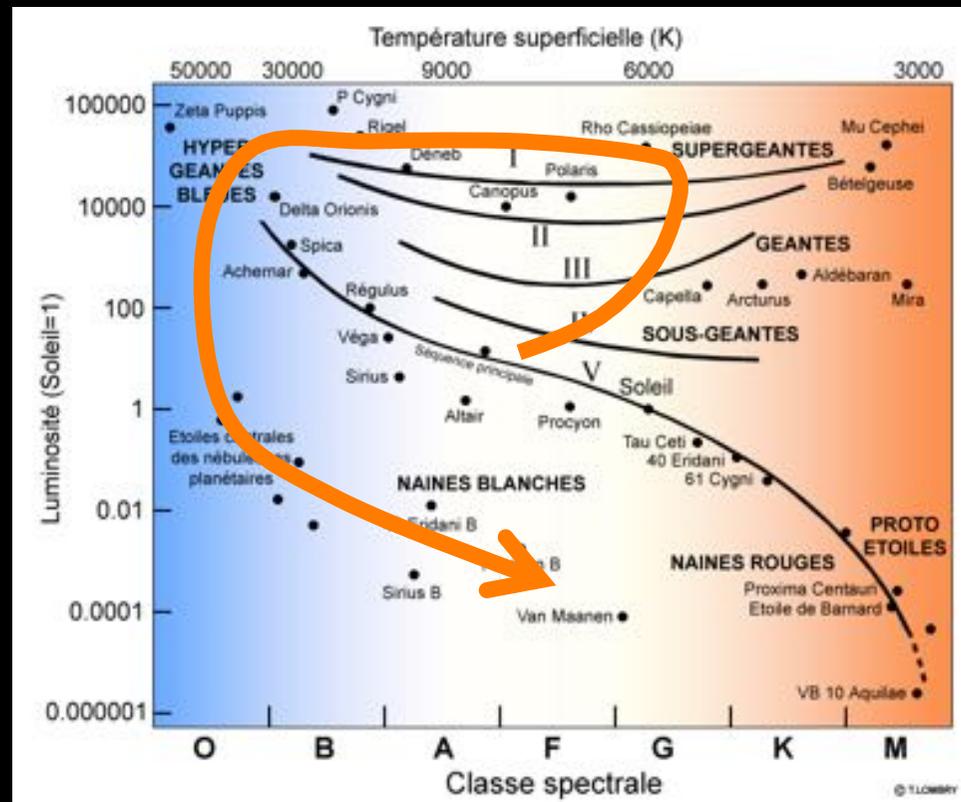
PRC95-48 - ST Sci OPO - November 29, 1995

T. Nakajima and S. Kulkarni (CalTech), S. Durrance and D. Golimowski (JHU), NASA

La physique des étoiles

Les obstacles ont été vaincus les uns après les autres. Aujourd'hui nous savons :

- Que les étoiles naissent sur la séquence principale
- Que les autres régions du diagramme HR correspondent à des stades d'évolution plus tardifs.
- Que l'évolution des étoiles dépend aussi de leur masse.

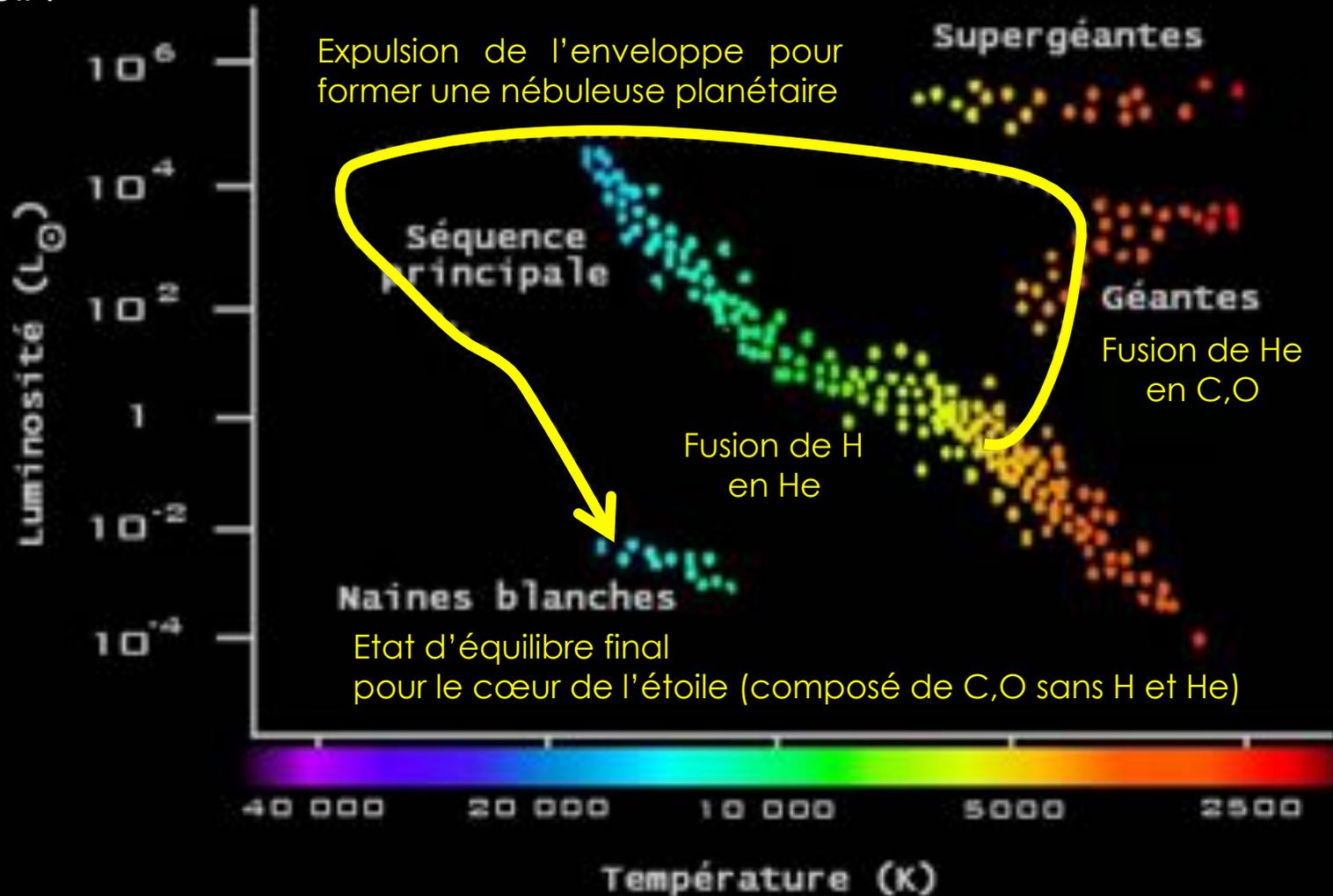


Effet d'évolution

Evolution stellaire

Les étoiles naissent sur la séquence principale (fusion de l'hydrogène en hélium) puis leur destin dépend de leur masse.

Le cas du Soleil :



Evolution stellaire

Compréhension de la séquence principale (fusion de H) : années 1930-1940.



Eddington (1882-1944)



Gamow (1904-1968)



Bethe (1906-2005)

Compréhension de la phase géante rouge (fusion de C) : années 1950



Hoyle (1915-2001)



Fowler (1911-1995)



Salpeter (1924-2008)

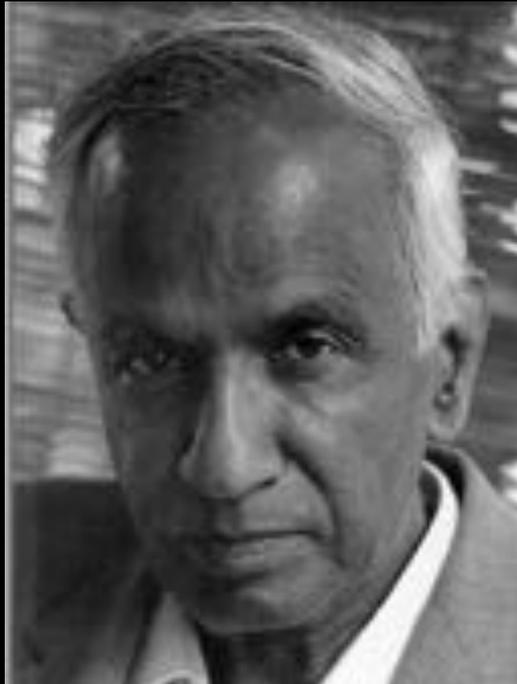
Les prix Nobel de l'astrophysique...

Prix Nobel de Physique 1983 :



« for his theoretical studies of the physical processes of importance to the structure and evolution of the stars » (SC)

« for his theoretical and experimental studies of the nuclear reactions of importance in the formation of the chemical elements in the universe » (WF)



Subramanyan
Chandrasekhar

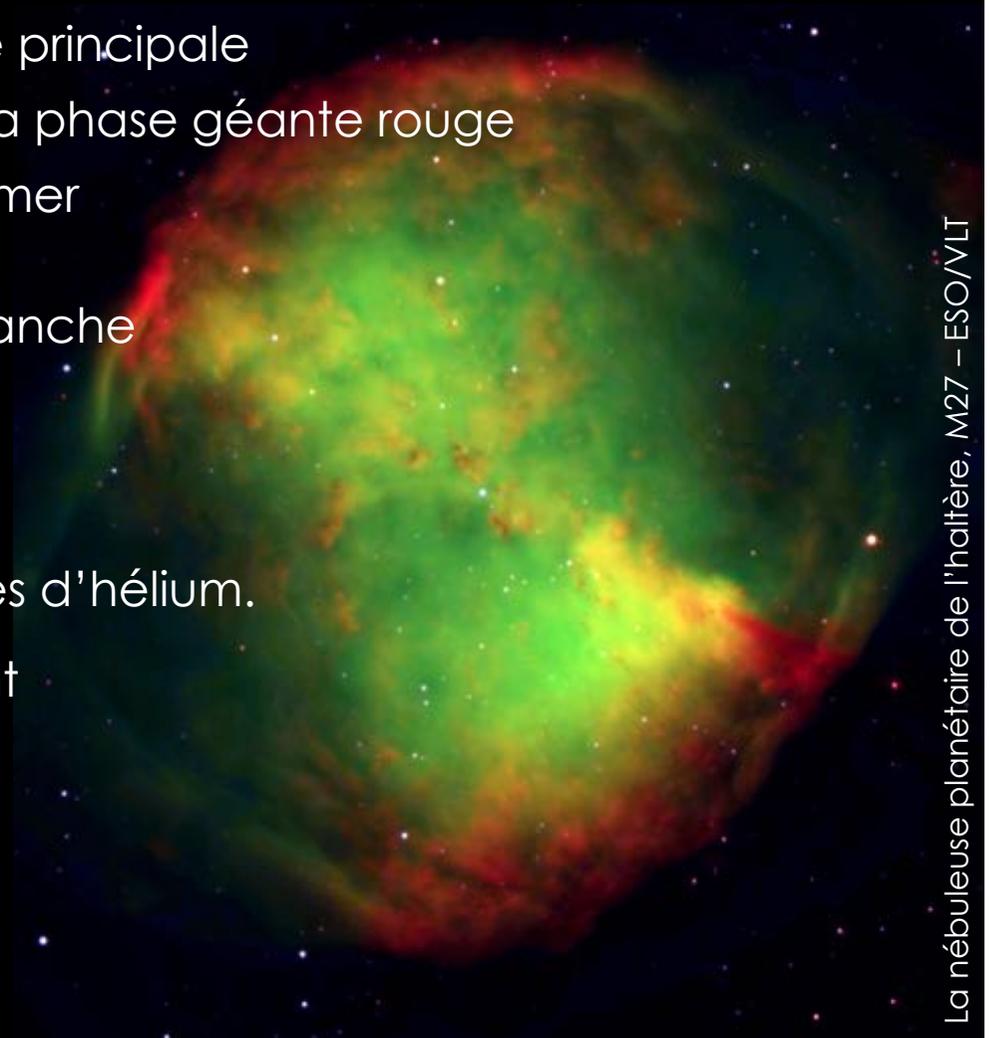


William Alfred Fowler

Evolution stellaire

Les étoiles naissent sur la séquence principale (fusion de l'hydrogène en hélium) puis leur destin dépend de leur masse.

- Les étoiles entre $\sim 0,8$ et $8 M_{\text{Soleil}}$ ont la même évolution que le Soleil
 - Fusion de H en He sur la séquence principale
 - Fusion de He en C et O pendant la phase géante rouge
 - Expulsion de l'enveloppe pour former une nébuleuse planétaire
 - Contraction du cœur en naine blanche composée de C et O.
- Les étoiles moins massives ne peuvent pas fusionner l'hélium. Elles forment donc directement des naines blanches d'hélium.
- Les étoiles entre ~ 8 et $\sim 9 M_{\text{Soleil}}$ peuvent encore fusionner le C en Ne et Mg. Elles forment des naines blanches de néon-magnésium.



La nébuleuse planétaire de l'haltère, M27 – ESO/MT

Evolution stellaire

Les étoiles naissent sur la séquence principale (fusion de l'hydrogène en hélium) puis leur destin dépend de leur masse.

- Les étoiles au delà de $\sim 9 M_{\text{Soleil}}$ ont un destin différent. Leur masse leur permet de passer par un grand nombre de phases de fusion
 - Fusion de H en He sur la séquence principale
 - Fusion de He en C et O
 - Fusion de C en Ne, Mg (et aussi un peu de Na)
 - Fusion de Ne en O et Mg
 - Fusion de O en Si (et aussi Ca, K, Cl, P, Ar, ...)
 - Fusion de Si pour former tous les éléments lourds jusqu'au fer.
- A chaque fois, la température centrale et la luminosité augmentent.
- La structure est très affectée (géante, super-géante).
- L'étoile est de moins en moins stable : perte de masse importante.
- L'évolution s'arrête après la fusion de Si. La fusion du fer n'est pas possible.



NGC 6888, la nébuleuse du croissant (Tony Hallas, \varnothing 40 cm). Cette « bulle » est poussée par les épisodes successifs de perte de masse (vents stellaires) subis par l'étoile massive au centre.

Evolution stellaire

Les étoiles naissent sur la séquence principale (fusion de l'hydrogène en hélium) puis leur destin dépend de leur masse.

- Les étoiles au delà de $\sim 9 M_{\text{Soleil}}$ ont un destin différent. Leur masse leur permet de passer par un grand nombre de phases de fusion
- Quand un cœur de fer est produit, il s'effondre en étoile à neutrons et le reste de l'étoile est expulsée par une explosion (supernova) : ➔ cours n°7.



La nébuleuse du Crabe (VLT/ESO), le reste de l'explosion d'une étoile d'environ $12 M_{\text{Soleil}}$.

Les étoiles, des systèmes ouverts

Les étoiles ne sont pas des systèmes fermés, elles échangent de la masse avec le milieu interstellaire :

- Vents stellaires
- Expulsion des nébuleuses planétaires
- Explosions de supernovae

L'étoile HD 65750 est une étoile très massive qui a expulsé une grande partie de sa masse. Celle-ci est observée sous la forme de la nébuleuse IC 2220, une nébuleuse par réflexion (→ cours n°8). La matière expulsée par l'étoile supergéante contient des éléments lourds et peut former des grains de silicates (poussières interstellaires) qui sont ensuite éclairés par l'étoile (Photo: STScI Digitized Sky Survey).

Evolution chimique

Grâce à la nucléosynthèse stellaire, les étoiles sont le moteur de l'évolution chimique de l'Univers. Elles lui ont permis de passer d'un état primordial qui ne contenait que de l'hydrogène et de l'hélium (→ cours n°11), à un état « enrichi » en éléments lourds (qui restent cependant minoritaires).

L'apparition d'éléments comme C, O, etc. a permis l'apparition de la vie : nous sommes de la « poussière d'étoiles » (*Poussières d'étoiles*, Hubert Reeves, 1984)

Le cycle de la matière et de l'enrichissement chimique sera à nouveau développé dans le cours n°8, cette fois du point de vue du milieu interstellaire.



Une région du ciel de 30'' observée en IR par Herschel (ESA)

Résumé du cours n°6

Les moyens instrumentaux de l'astrophysique moderne permettent de mesurer de nombreuses propriétés des étoiles, malgré leur distance. Une grande diversité est mise en évidence, avec cependant une certaine organisation (diagramme HR) qui permet d'accéder à la compréhension physique de ces astres.

Les étoiles tirent leur énergie de la fusion nucléaire : celle de l'hydrogène pour la plus grande partie de leur vie (séquence principale), celle d'éléments plus lourds dans les phases avancées (géantes, super-géantes).

Leur structure, leur temps de vie et leur évolution dépendent de leur masse.

Les étoiles de masse inférieure à $9 M_{\text{soleil}}$ arrivent à brûler l'hydrogène de leur cœur, éventuellement l'hélium, et le carbone/néon pour les plus massives. Ensuite, le cœur s'effondre en naine blanche et l'enveloppe est expulsée pour donner une nébuleuse planétaire.

Les étoiles plus massives passent par tous les cycles de fusion jusqu'à la fusion du silicium et la production d'un cœur de fer. Le cœur s'effondre alors en étoile à neutrons et l'enveloppe est éjectée par une explosion (supernova).

De leur naissance à leur mort, les étoiles sont des systèmes ouverts (vents, explosions) qui échangent de la matière avec le milieu interstellaire. Elles jouent le rôle fondamental de moteur de l'évolution chimique de l'Univers.

Prochains cours

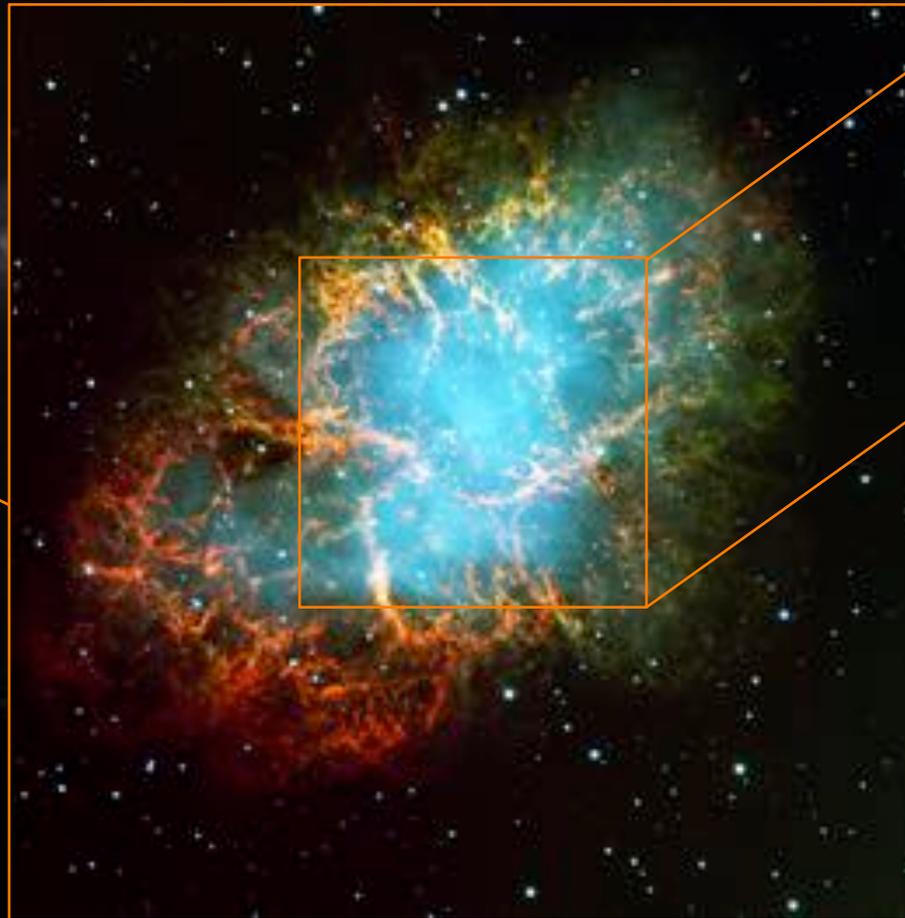


Montage ESO de photographies prises au Chili (La Silla & Paranal) et aux Canaries (La Palma)

Prochains cours

Cours n°7 – Explosions et monstres cosmiques, supernovae, étoiles à neutrons et trous noirs : lundi prochain, 12 décembre
Cours n°8 après les vacances de Noël, le lundi 9 janvier.

La nébuleuse du Crabe
à 6 300 années lumière (ESO-VLT)



Rayons X (Chandra)

Prochains cours

Construire la vision moderne de l'Univers

1. Introduction: qu'est ce que l'astrophysique
 2. Notre étoile, le Soleil
 3. De la lunette de Galilée
aux télescopes spatiaux :
l'observation en astronomie
 4. Panorama du système solaire
 5. A la recherche d'autres mondes,
les exoplanètes
 6. Vie et mort des étoiles
 7. Explosions et monstres cosmiques :
supernovae, étoiles à neutrons, trous noirs
 8. Les nuages interstellaires
et la formation des étoiles
 9. La Voie Lactée et les galaxies proches
 10. L'Univers lointain
 11. La cosmologie moderne :
un Univers en évolution
 12. Conclusion :
les défis pour l'astrophysique contemporaine
- 

Page web du cours

Les transparents + quelques liens + une courte bibliographie

http://www.iap.fr/users/daigne/FD_IAP/UIA2011.html

Courriels :

Patrick Boissé :	boisse@iap.fr
Frédéric Daigne :	daigne@iap.fr

