

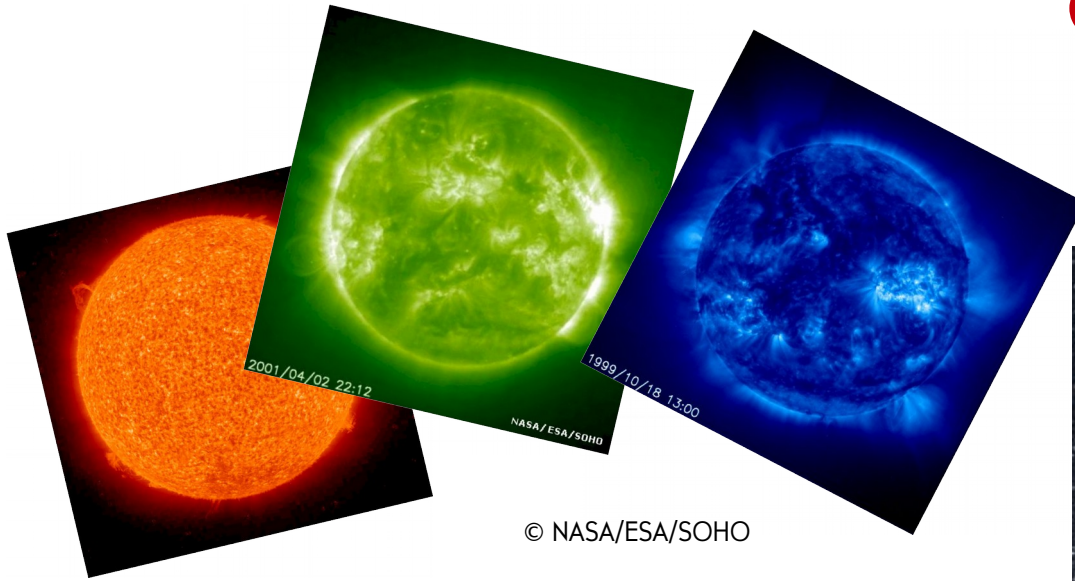
ÉTOILES ETC...

Ana PALACIOS

Summer Camp L2 OCEVU 2017



Qu'est-ce qu'une étoile ?

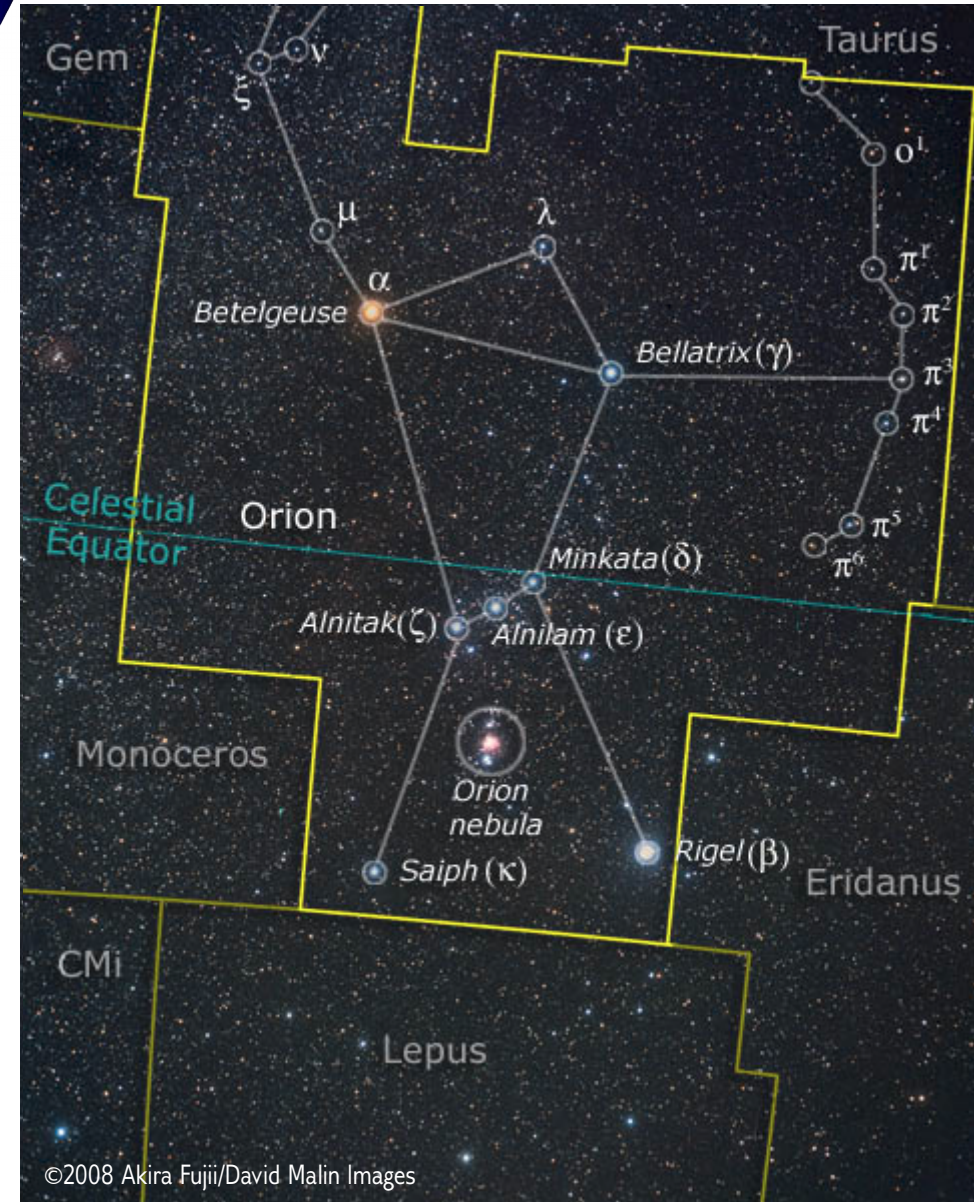


© NASA/ESA/SOHO

Soleil : naine jaune de type G5

Betelgeuse : supergéante rouge de type M2

Rigel : supergéante bleue de type B8

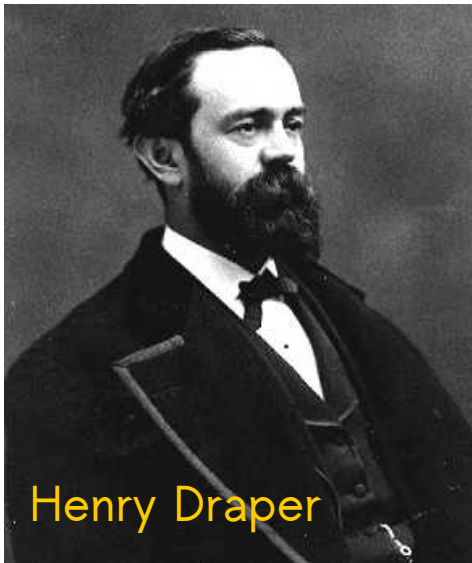


©2008 Akira Fujii/David Malin Images

Qu'est-ce qu'une étoile ?

Une étoile est « *un astre brillant de sa propre lumière, observable sous la forme d'un point scintillant, sans mouvement apparent.* » (dictionnaire académique)

Pour étudier les étoiles on analyse donc leur lumière via différentes techniques d'observation dont la **photométrie** et la **spectroscopie**.



1872

Rassemble des spectres sur plaques photo

Catalogue HD



1919-1924

Classifie 225 000 étoiles jusqu'à des éclats faibles pour l'époque

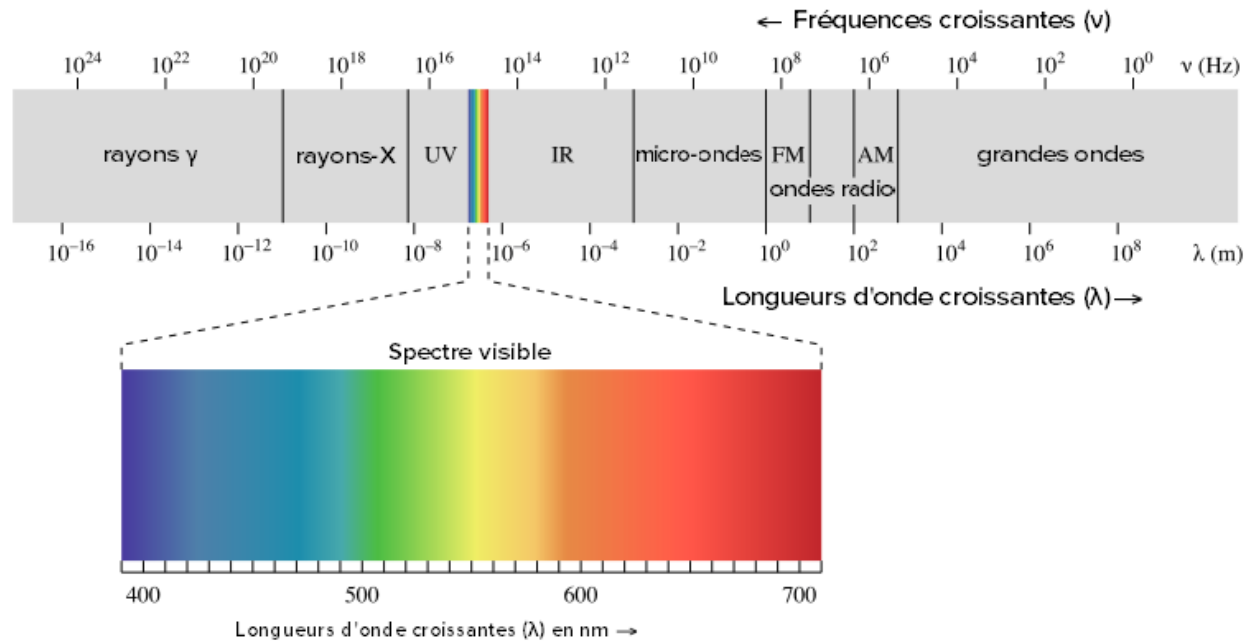
Classification de Harvard

Classification spectrale des étoiles

1666 Newton montre que la lumière du soleil se décompose en un ensemble de couleurs contigües : le spectre

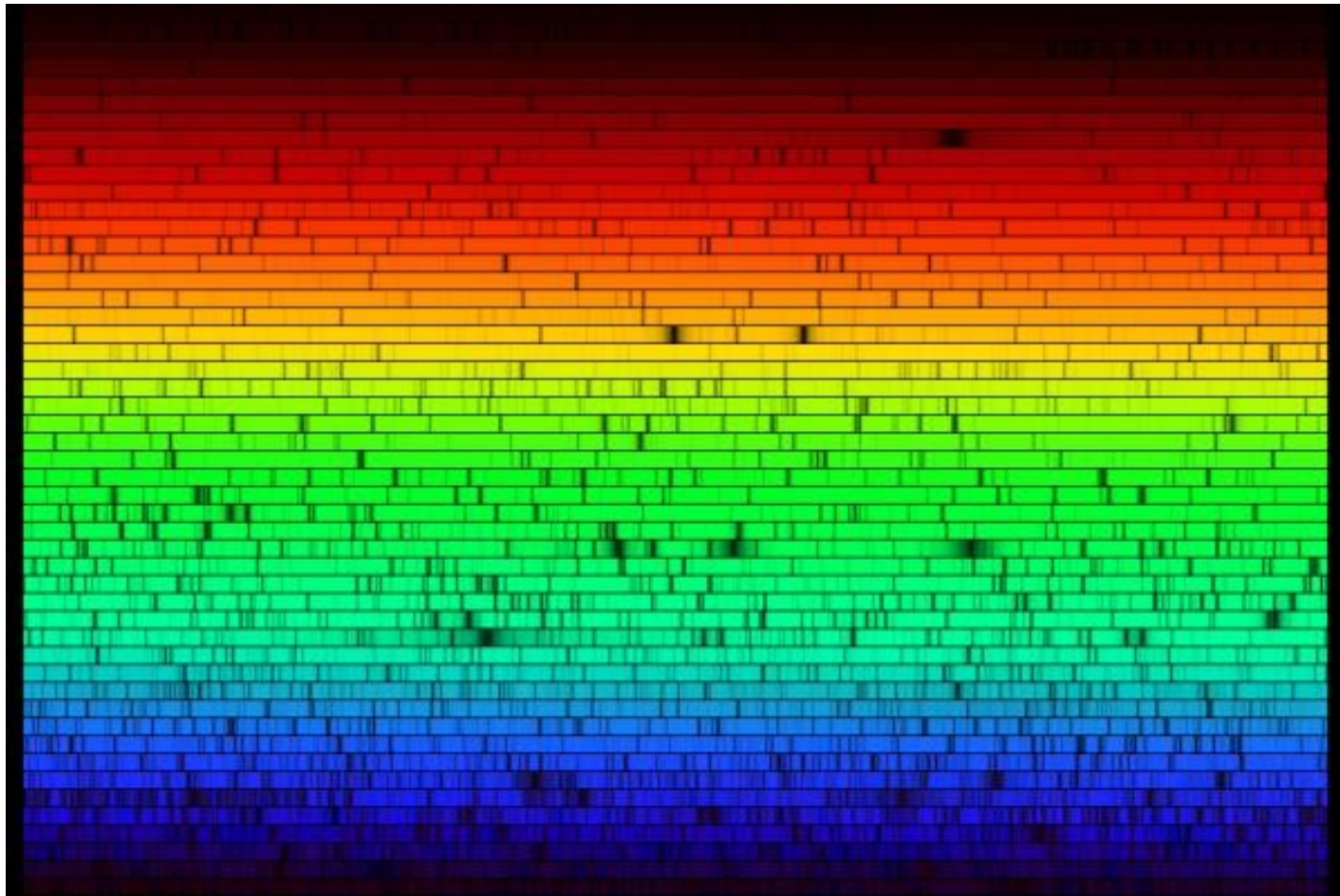


Le rayonnement infrarouge est découvert par Herschel à la fin du XVIIIème siècle



Classification spectrale des étoiles

La spectroscopie a joué et joue toujours un grand rôle. Elle nous permet d'analyser en détail la lumière des astres et d'en déduire leur température, leur composition chimique, etc.

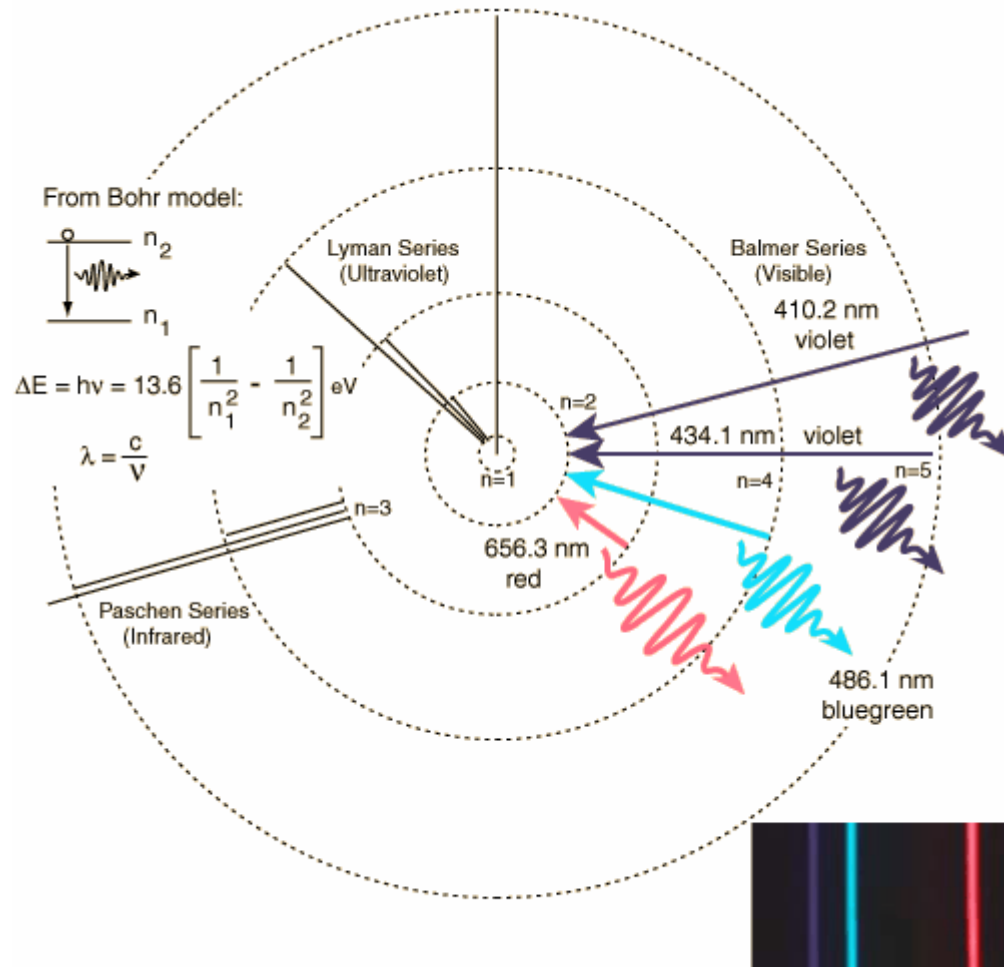


Spektrum detailliert des Sonne mit sehr hoher spektraler Auflösung, zerlegt und gestapelt

Classification spectrale des étoiles

Les raies dans les spectres sont dues à des transitions électroniques dans les atomes

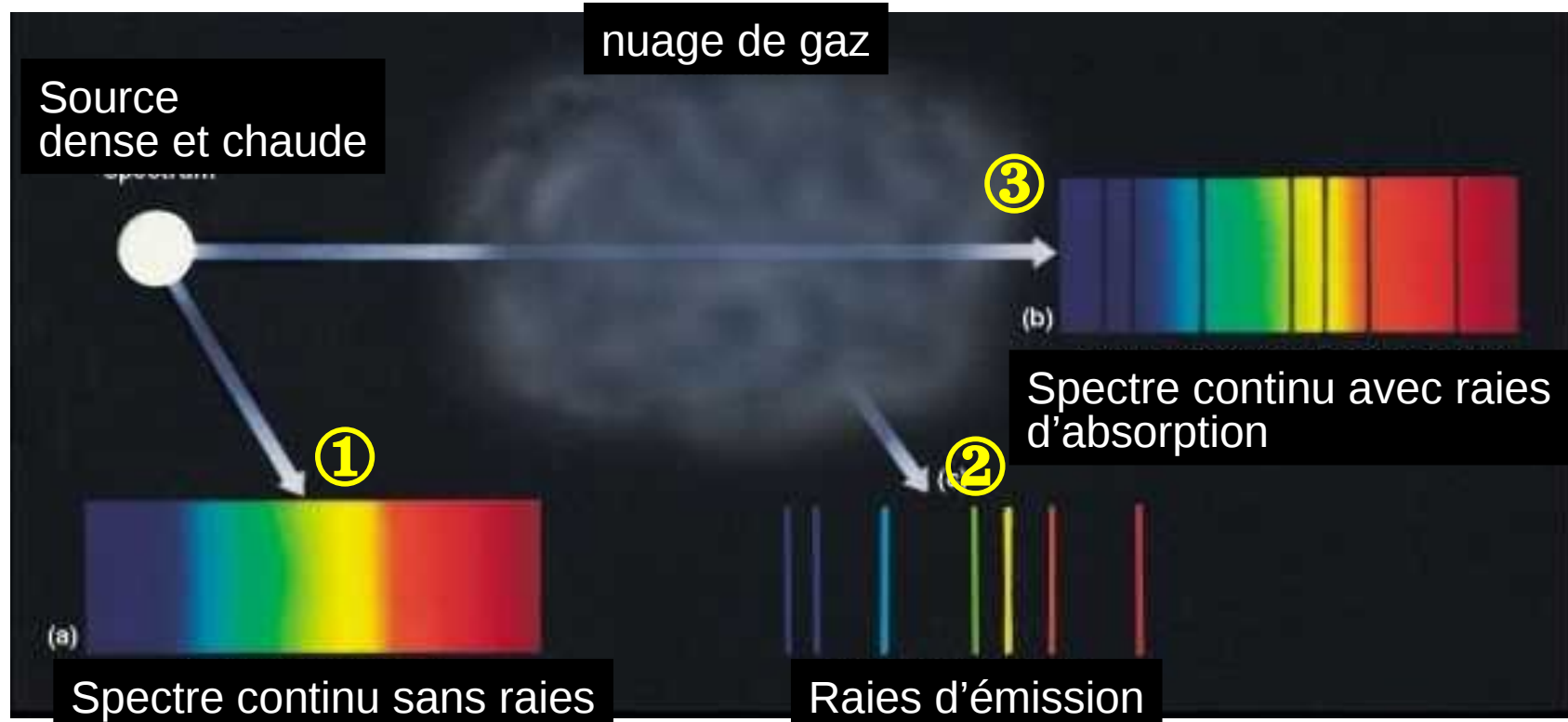
Atome d'hydrogène - modèle de Bohr



Classification spectrale des étoiles

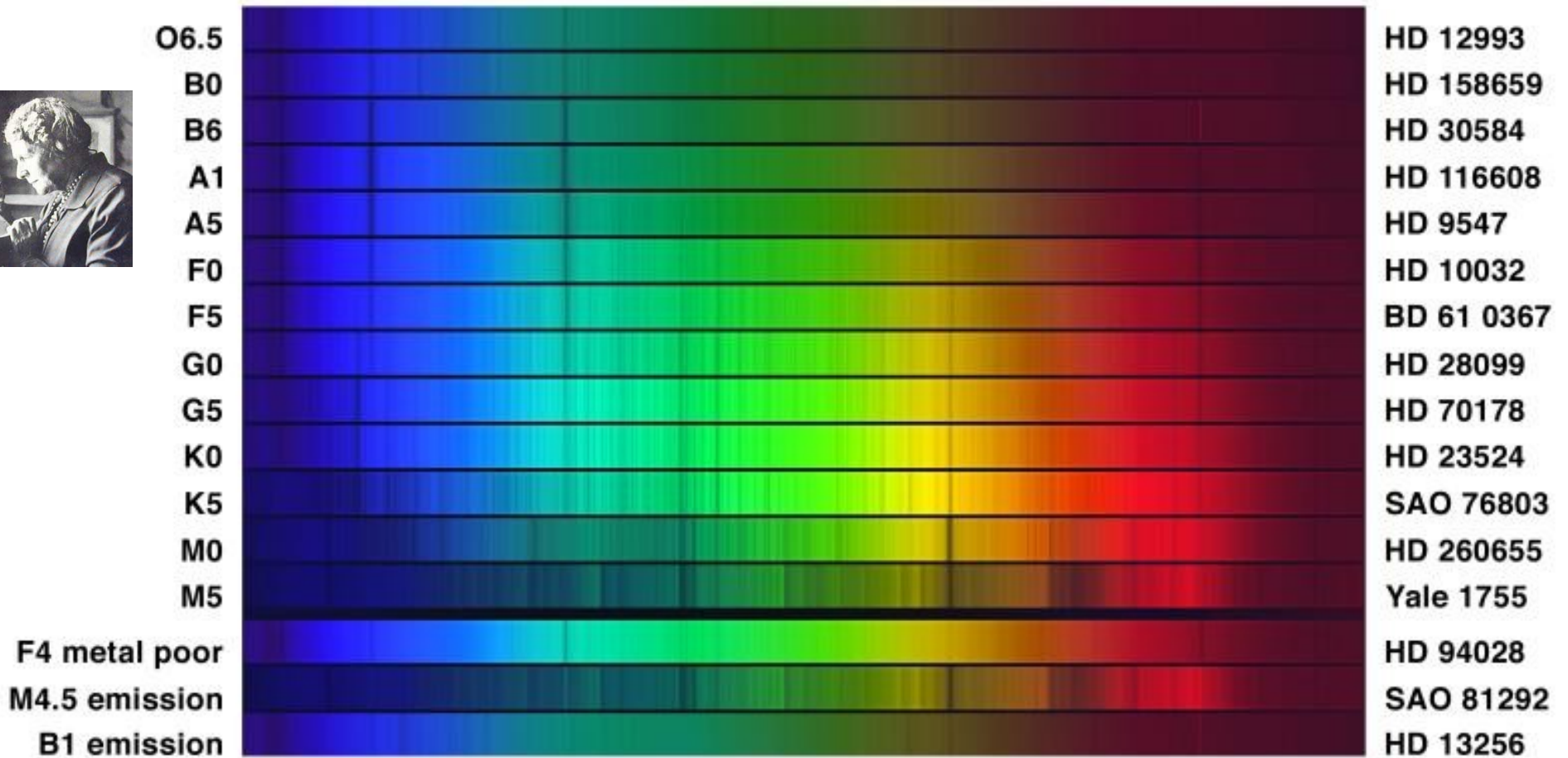
Lois de Kirchhoff

- ① Un corps dense et chaud émet un spectre continu
- ② Des raies sombres d'absorption apparaissent dans le spectre continu quand la lumière d'un corps dense et chaud traverse un nuage plus froid
- ③ Un gaz transparent produit des raies brillantes d'émission



Classification spectrale des étoiles

Différentes classes d'étoiles se distinguent par des spectres différents.



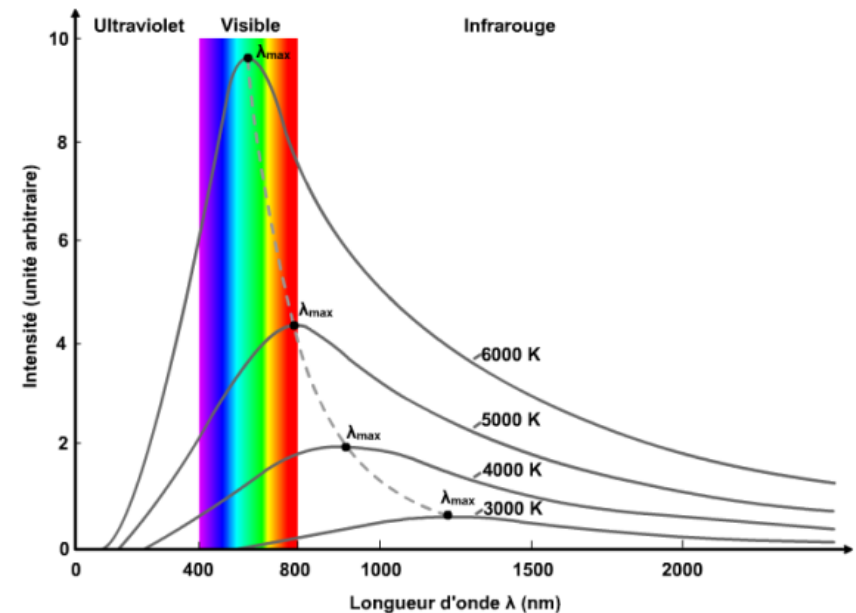
Classification spectrale des étoiles

Classe	température	couleur	raies d'absorption
O	28 000 - 50 000 °C	bleue	azote, carbone, hélium et oxygène
B	9 600 - 28 000 °C	bleue-blanche	hélium, hydrogène
A	7 100 - 9 600 °C	blanche	hydrogène
F	5 700 - 7 100 °C	jaune-blanche	métaux: fer, titane, calcium, strontium et magnésium
G	4 600 - 5 700 °C	jaune (comme le Soleil)	calcium, hélium, hydrogène et métaux
K	3 200 - 4 600 °C	jaune-orange	métaux et oxyde de titane
M	1 700 - 3 200 °C	rouge	métaux et oxyde de titane

Il existe une relation entre type spectral et température effective

→ Loi de Wien

$$\lambda_{\max} T = 2897 \mu\text{mK}$$



Classification évolutive des étoiles

Plus précisément une étoile est un « corps céleste plasmatique qui rayonne sa propre lumière par réactions de fusion nucléaire, ou un corps qui a été dans cet état à un stade de son cycle de vie » (d'après wikipédia)

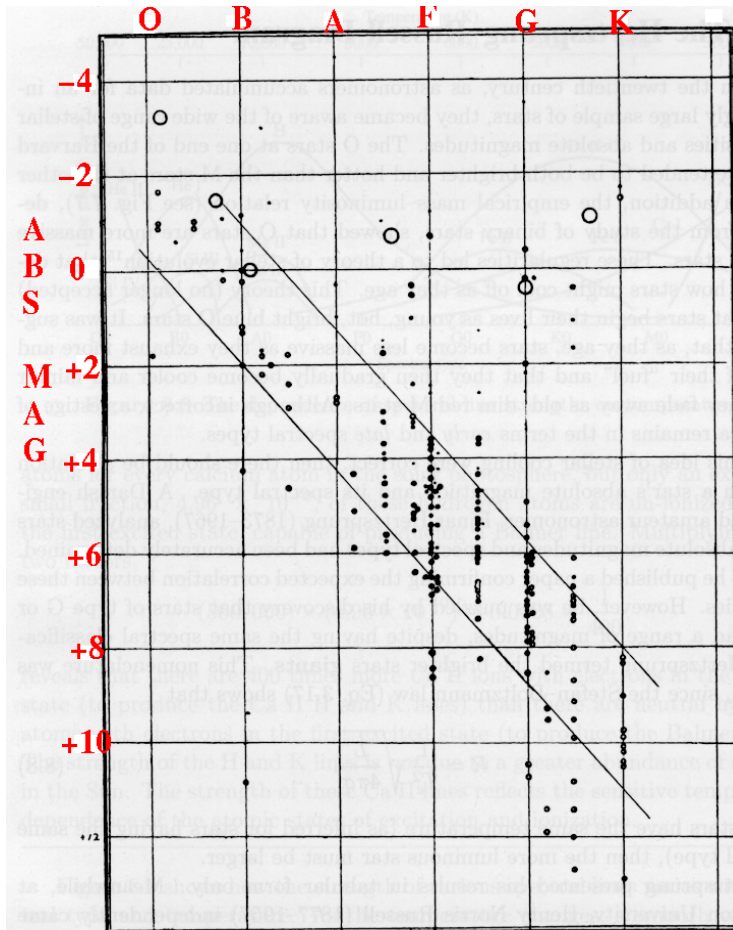
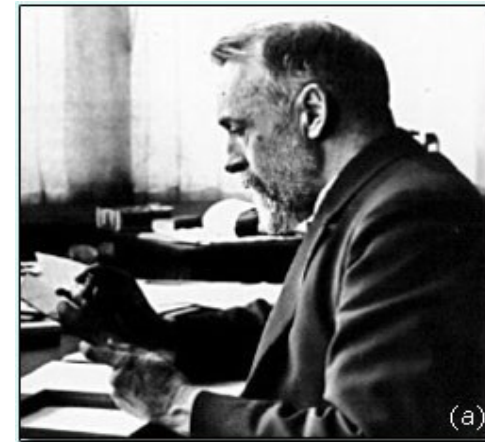
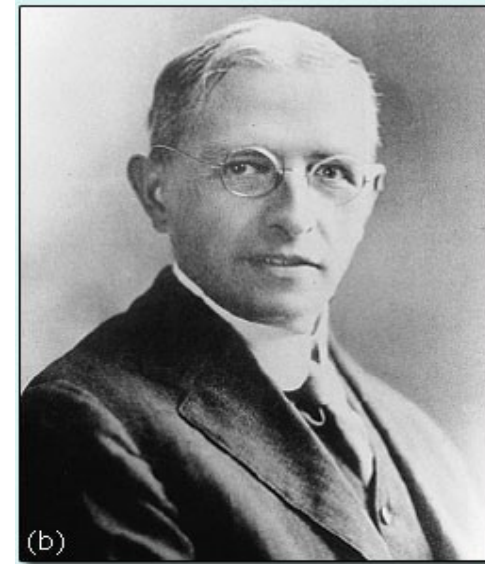


Figure 8.10 Henry Norris Russell's first diagram, with spectral types listed along the top and absolute magnitudes on the left-hand side. (Figure from Russell, *Nature*, 93, 252, 1914.)

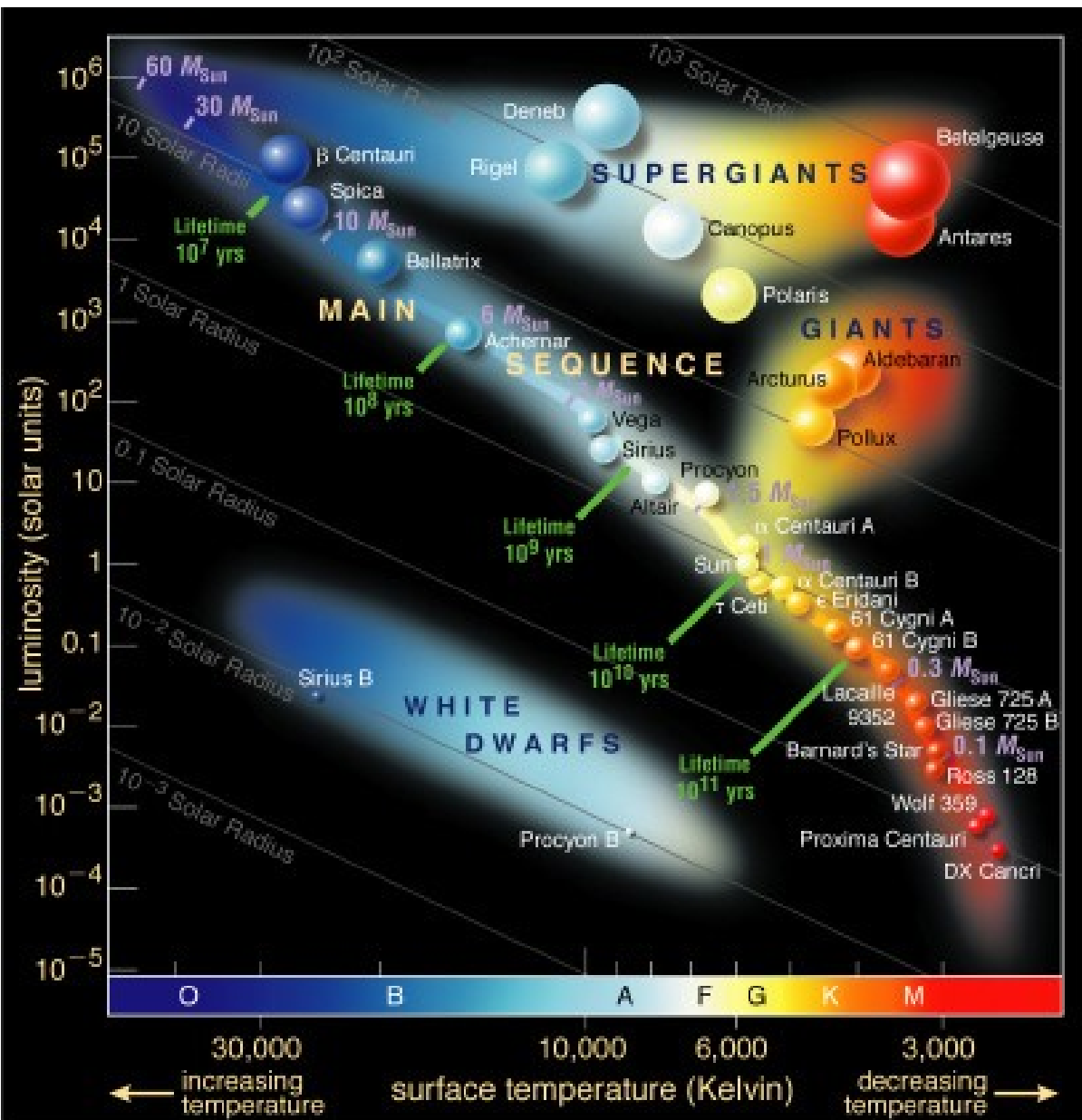


Hertzsprung



Russell

Classification évolutive des étoiles

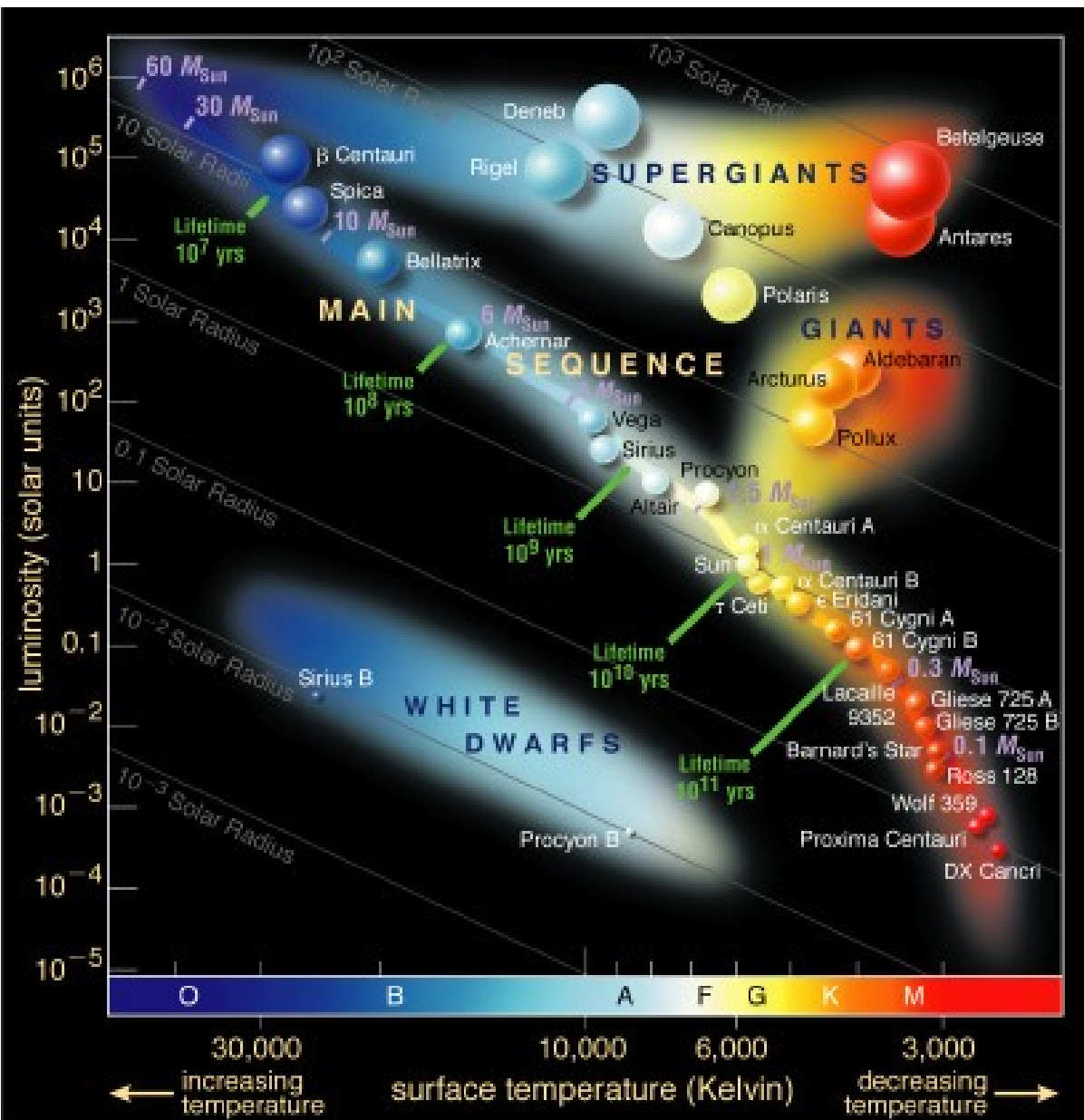


Grâce à la compréhension de ces spectres on peut classer les étoiles, déterminer leurs paramètres physiques et, par exemple, les placer dans un diagramme température de surface - luminosité

→

diagramme de Hertzsprung-Russell ou diagramme HR

Classification évolutive des étoiles



Sur ce diagramme, les étoiles ne sont pas disposées au hasard.

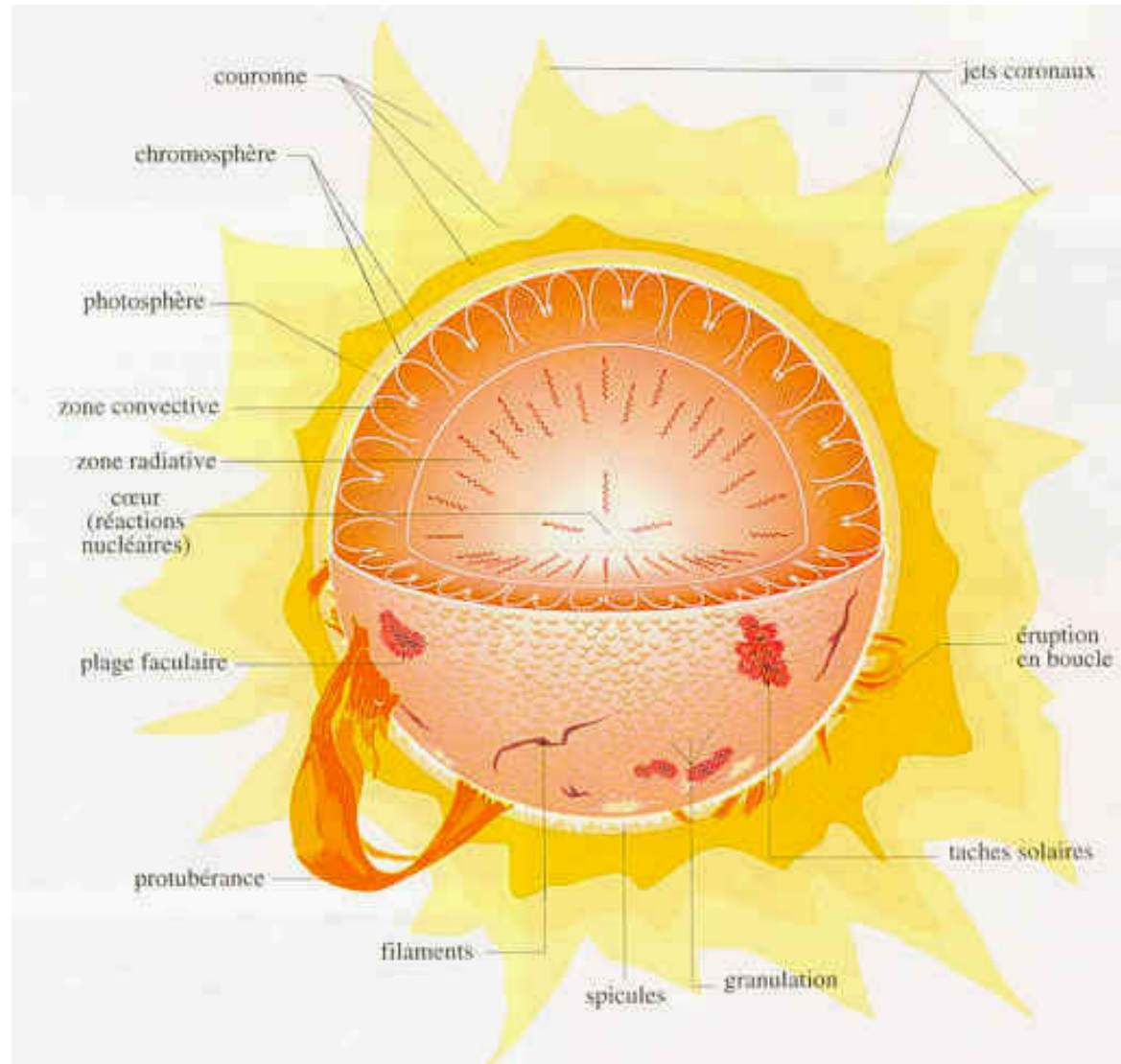
→

C'est un diagramme d'évolution.

La théorie de l'évolution stellaire nous donne les clefs pour le lire

Structure interne du Soleil

La structure interne de toutes les étoiles sur la séquence principale de masses initiales comprises entre 0.6 et $1.3 M_{\odot}$ est similaire à celle du Soleil. Mais la structure interne d'étoiles de masses différentes et/ou de stade évolutif différent sera différente.

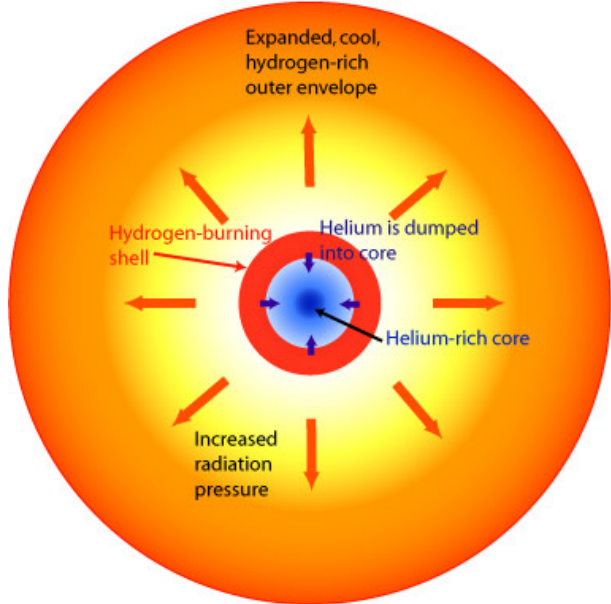
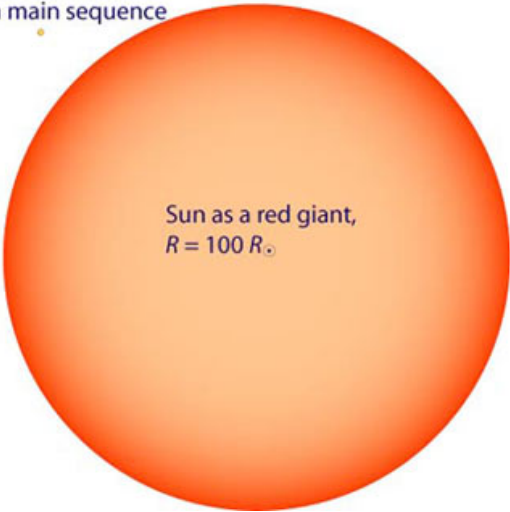


Structure interne du Soleil

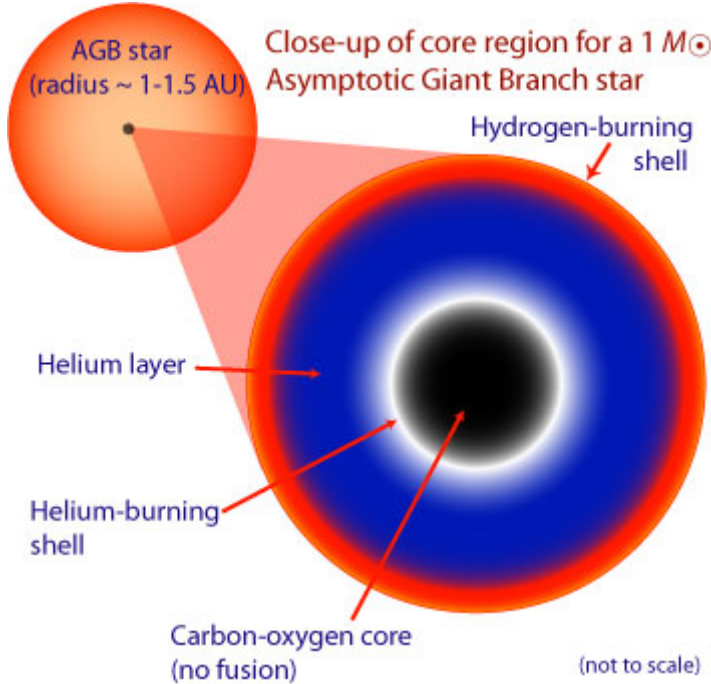
Evolution temporelle de la structure d'une étoile comme le Soleil

Comparison in size of Sun as a main sequence star and a red giant

Sun as a main sequence star

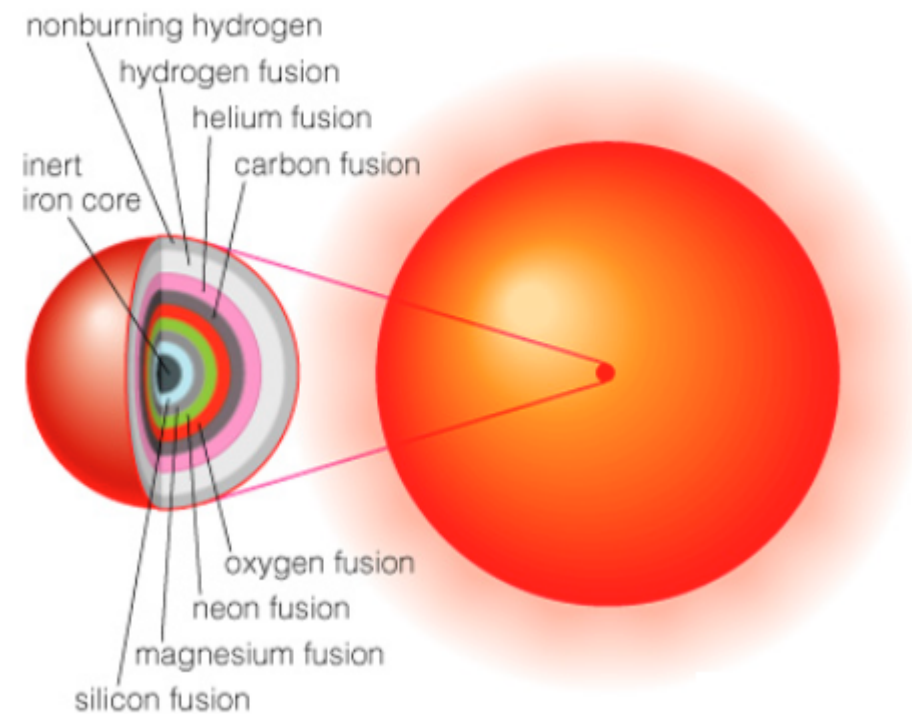
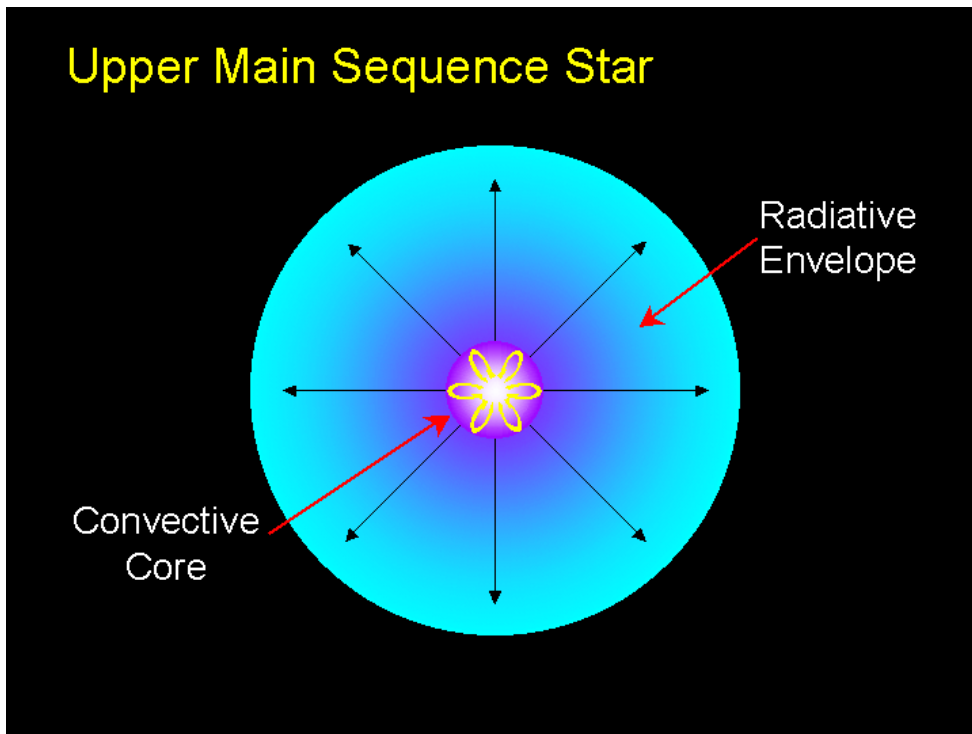


Hydrogen Shell Burning on the Red Giant Branch



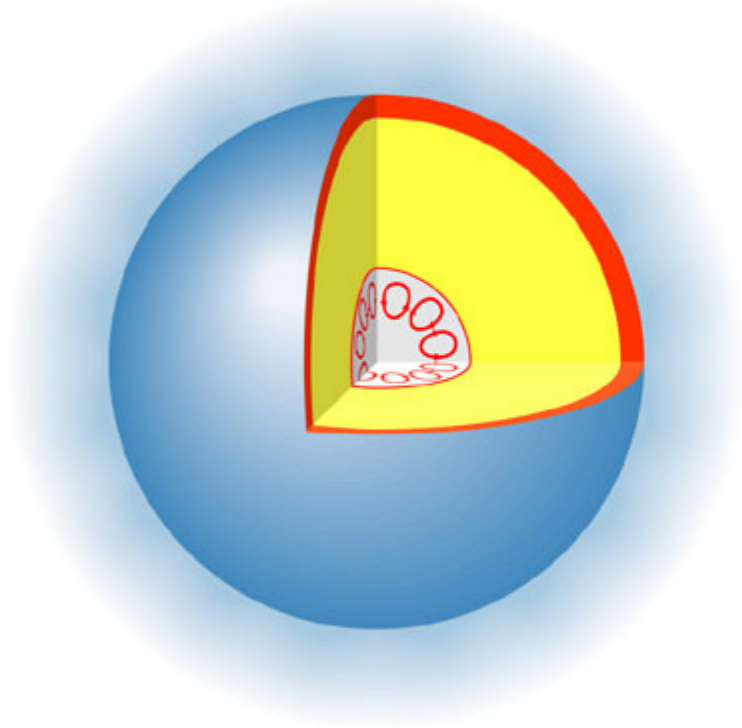
Structure interne du Soleil

Evolution temporelle de la structure d'une étoile comme Bételgeuse

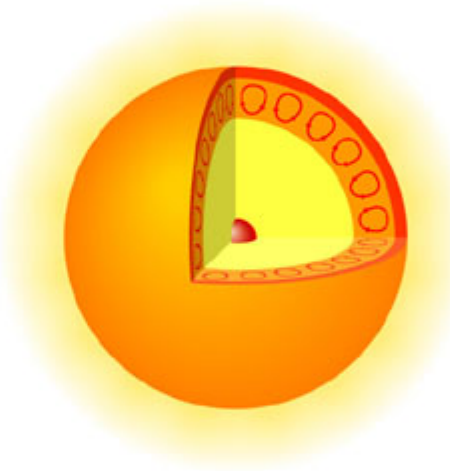


Structure interne des étoiles naines

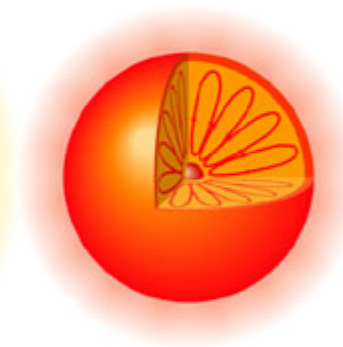
high-mass star



$1M_{\text{Sun}}$ star



very low mass star



Bilan énergétique dans les étoiles naines

pression
gravité



Equilibre entre pression du gaz (et du rayonnement) et gravité

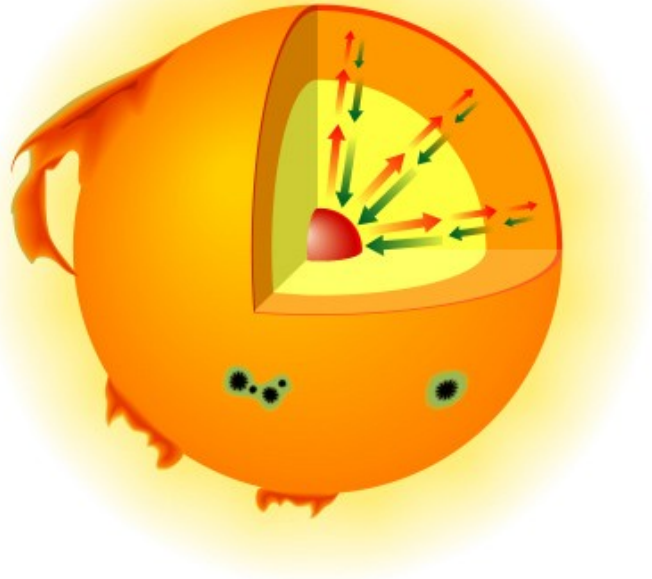
→ maintien de l'étoile à une luminosité et une température données

La pression du gaz est d'autant plus grande que le gaz est *dense* et *chaud*

Au coeur du Soleil, on a

$$T \approx 15 \cdot 10^6 \text{ K}, \rho \approx 1,6 \cdot 10^5 \text{ kg/m}^3$$

Le Soleil (comme les autres étoiles de la séquence principale) est en **équilibre hydrostatique** : la pression compense presque exactement la gravité

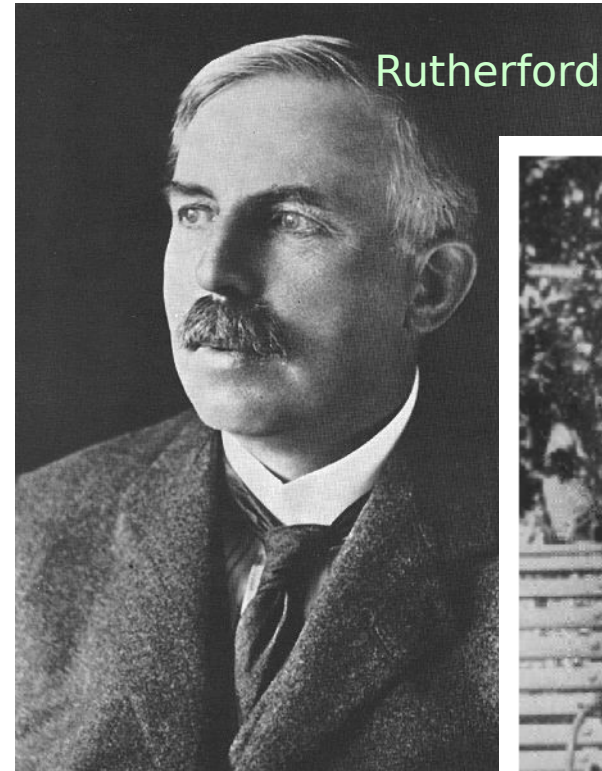


Production énergétique stellaire

Qu'est-ce qui est à l'origine de cette pression?

Quelle est la source d'énergie dans le Soleil?

Rutherford

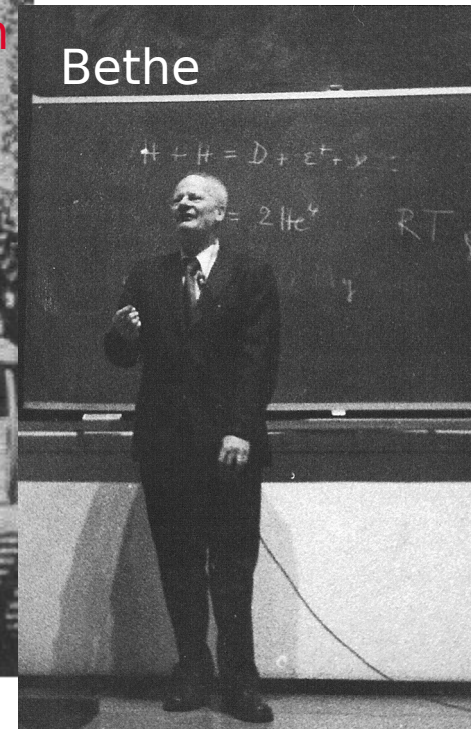


Einstein



Eddington

Bethe

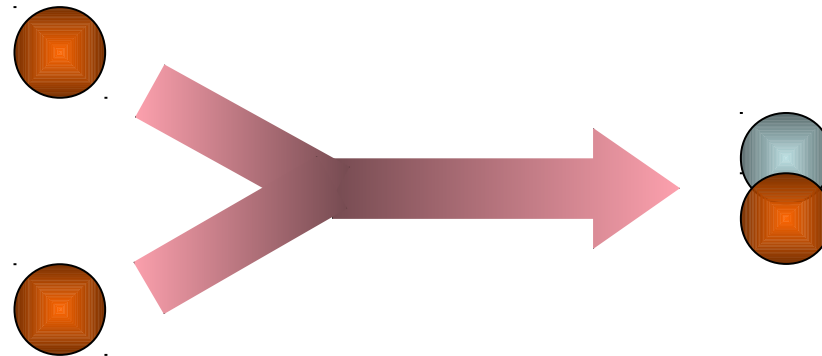


Production énergétique stellaire

Qu'est-ce qui est à l'origine de cette pression?

Quelle est la source d'énergie dans le Soleil?

Les réactions de fusion nucléaire



Deux noyaux légers fusionnent pour donner un noyau plus lourd + de l'énergie

Production énergétique stellaire

Sir Eddington, The internal constitution of the stars, The Observatory, 43, 341 (1920)

unburied corpse. But if we decide to inter the corpse, let us frankly recognize the position in which we are left. A star is drawing on some vast reservoir of energy by means unknown to us. This reservoir can scarcely be other than the sub-atomic

helium is made out of hydrogen. If 5 per cent. of a star's mass consists initially of hydrogen atoms, which are gradually being combined to form more complex elements, the total heat liberated will more than suffice for our demands, and we need look no further for the source of a star's energy.

we may hear about at this meeting, make it probable to my mind that some portion of this sub-atomic energy is actually being set free in the stars. F. W. Aston's experiments seem to leave no atoms bound with 2 electrons. But Aston has further shown conclusively that the mass of the helium atom is less than the sum of the masses of the 4 hydrogen atoms which enter into it—

Production énergétique stellaire

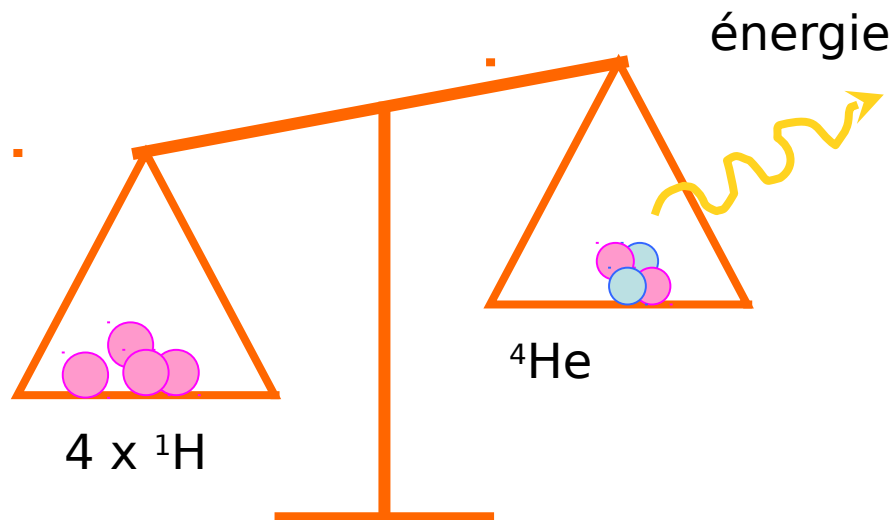
Fusion des noyaux d'hydrogène (H) en noyaux d'hélium (He)



$$m(\text{H}) = 1,007825 \text{ u.m.a.}$$

$$m(\text{He}) = 4,002603 \text{ u.m.a.}$$

$$(1 \text{ u.m.a.} = 1,661 \cdot 10^{-27} \text{ kg})$$



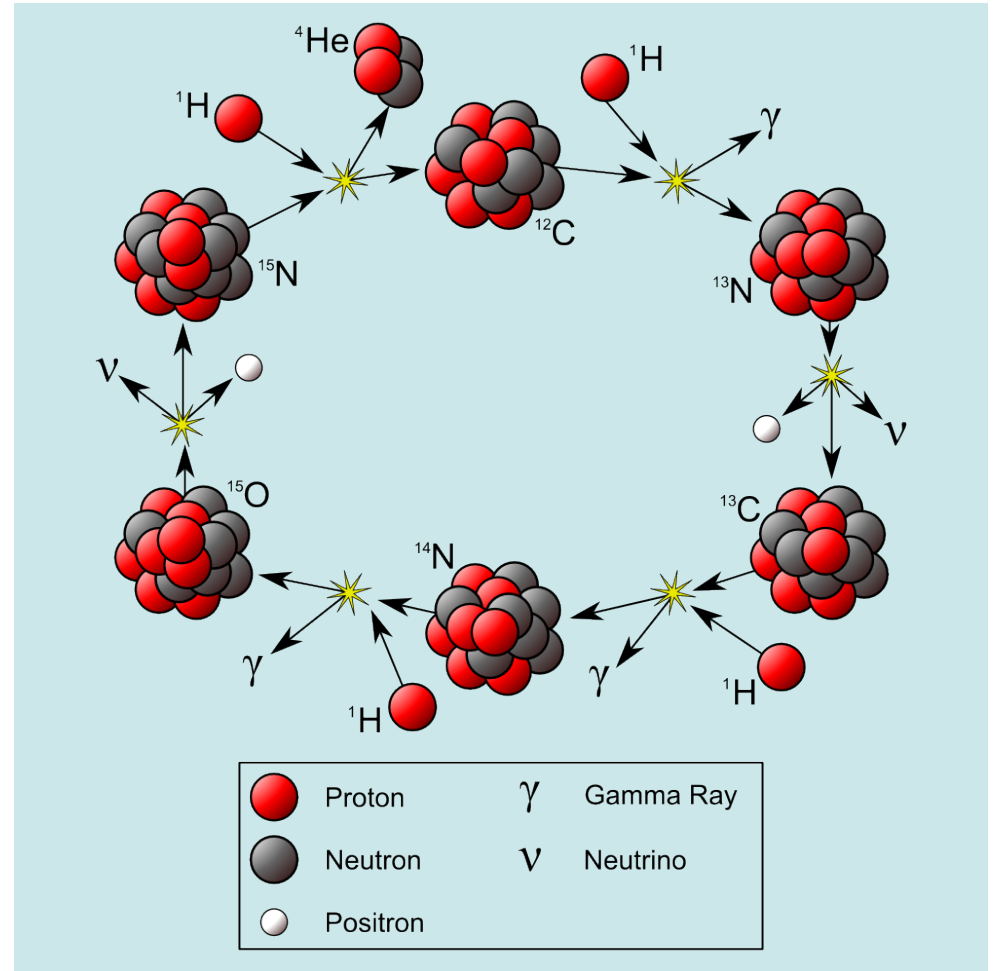
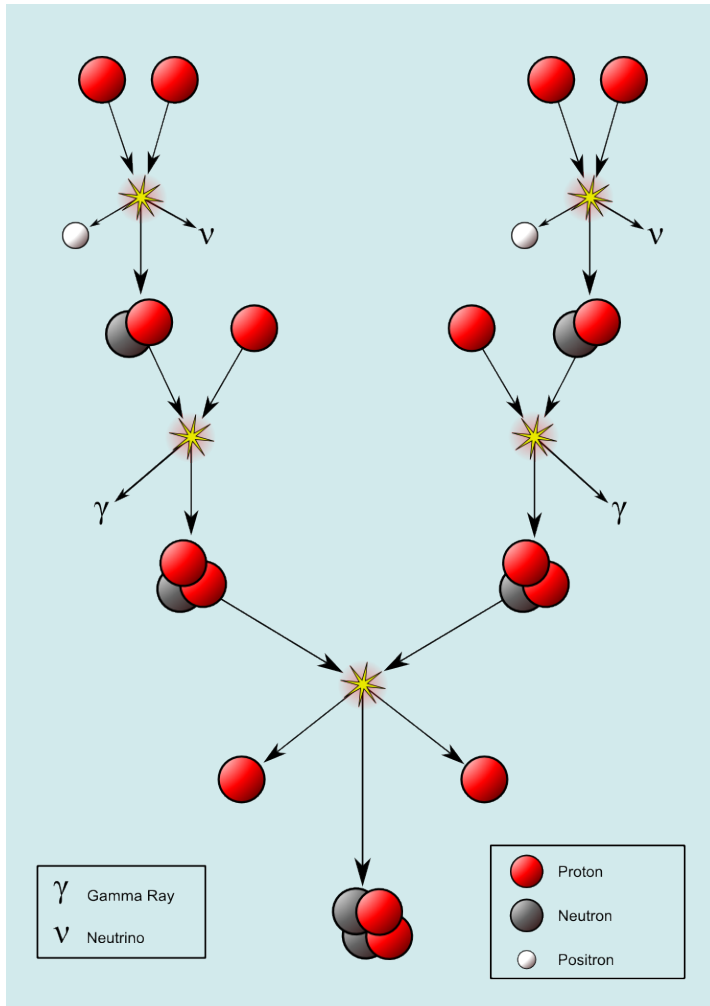
$$m(\text{He}) < 4 \times m(\text{H}) !$$

conversion masse - énergie

$$E = \Delta m \cdot c^2 = 4,29 \cdot 10^{-12} \text{ J / réaction}$$

Production énergétique stellaire

Chaînes pp et cycle CNO constituent les groupes de réactions nucléaires conduisant à la fusion d'hydrogène en hélium dans les étoiles



Fusion et évolution

Si la température s'élève suffisamment, il peut y avoir d'autres réactions de fusion que celle de l'hydrogène en hélium :

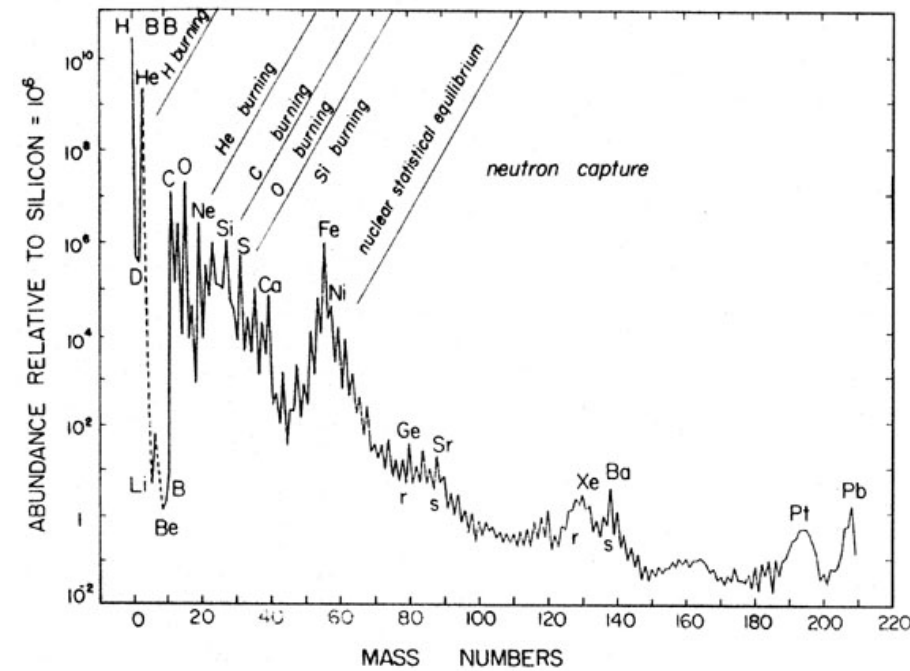
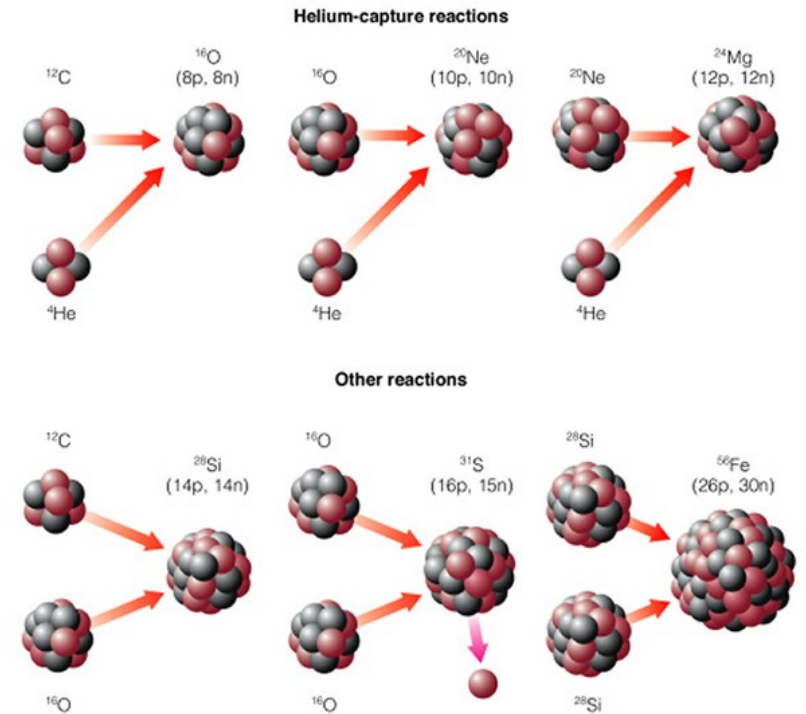


Plus l'intérieur des étoiles est chaud, plus elles produisent des éléments lourds.

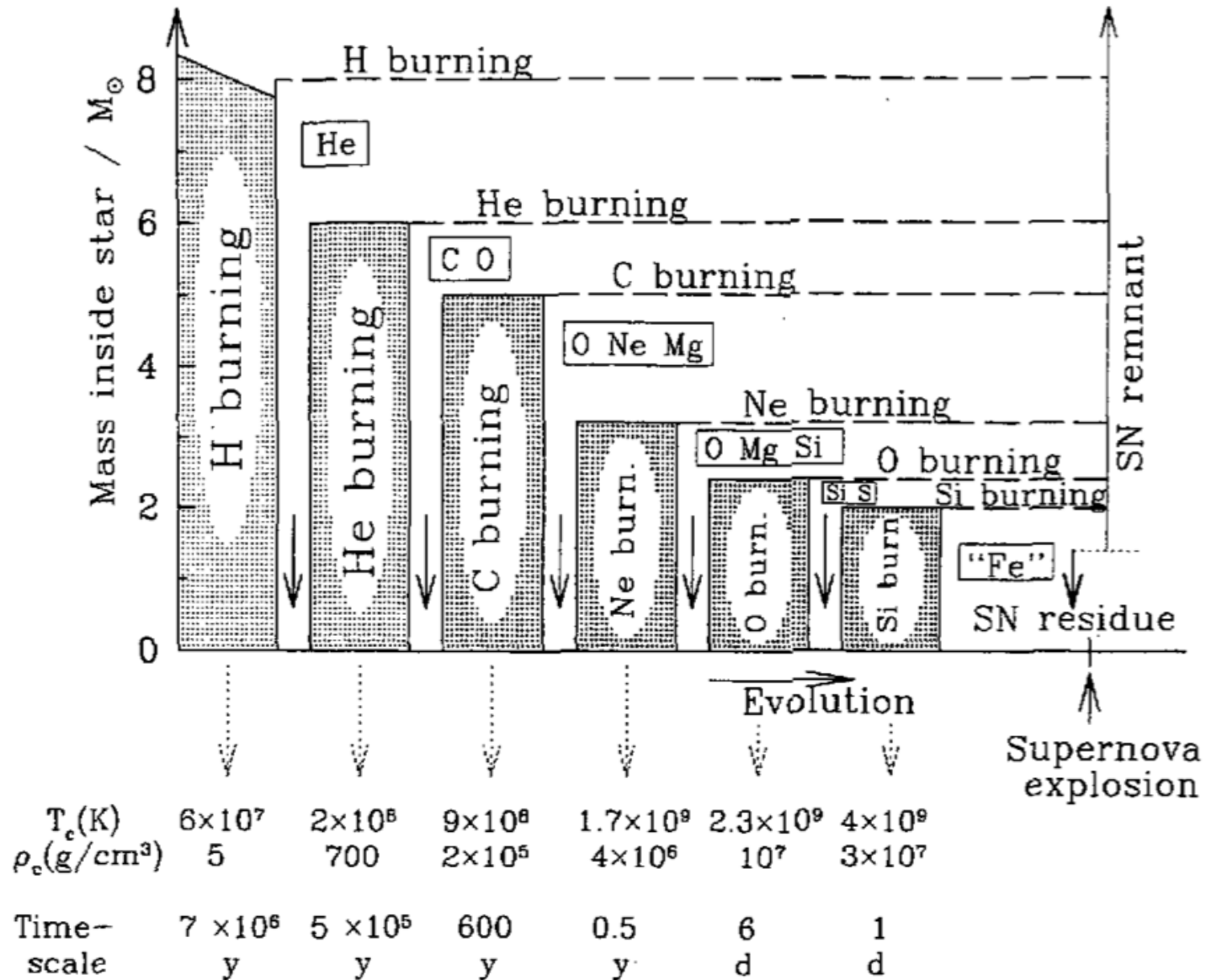
Plus les étoiles sont massives, plus leur intérieur est chaud → les étoiles massives produisent des éléments plus lourds par fusion nucléaire

Chaque réaction de fusion produit de l'énergie

Les noyaux de fer ne fusionnent pas (fusion endothermique très instable)



Fusion et évolution

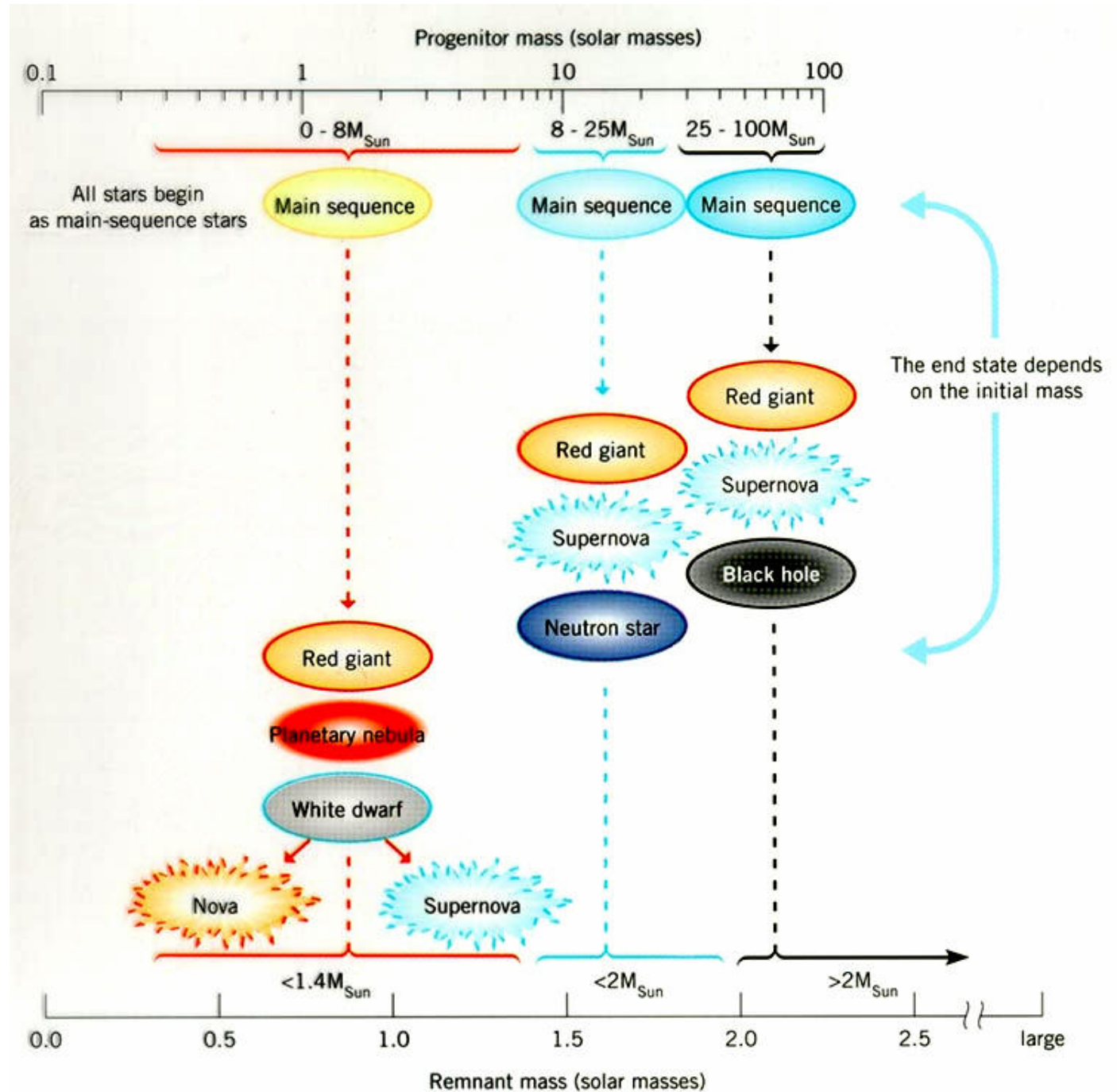


Résumé d'évolution stellaire

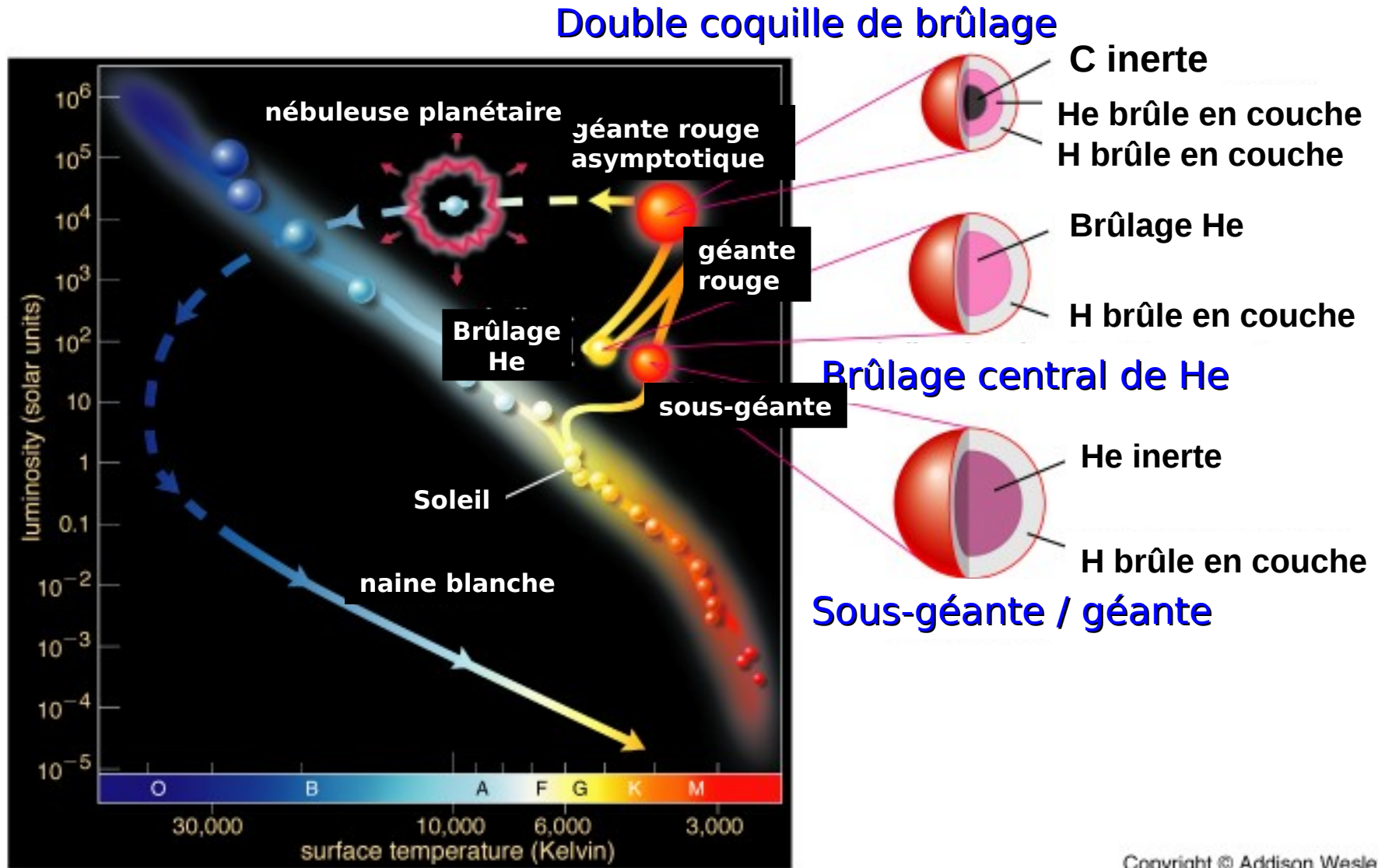
Les étoiles évoluent et se déplacent dans le diagramme de Hertzsprung-Russell

Au cours de leur "vie" elles changent de luminosité, de rayon, de température.

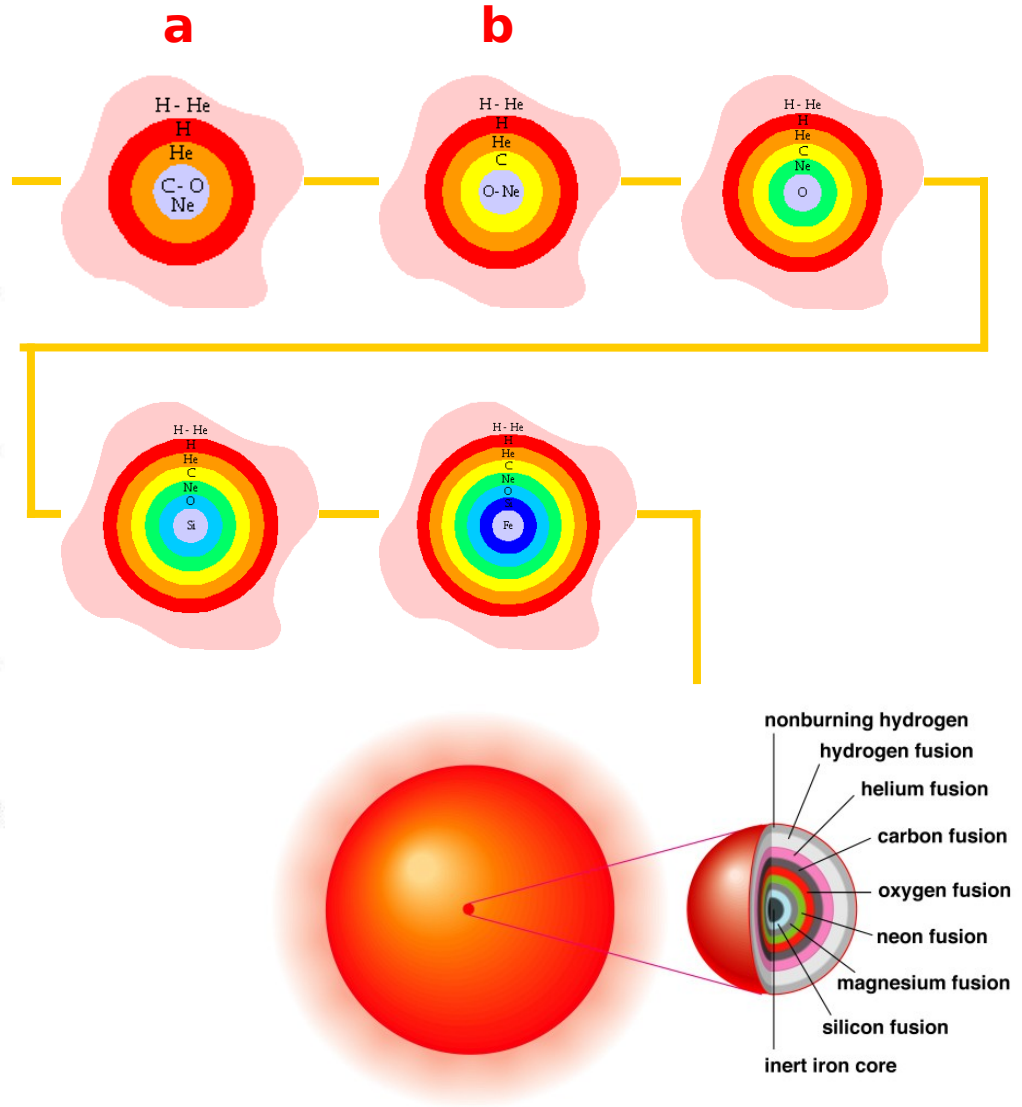
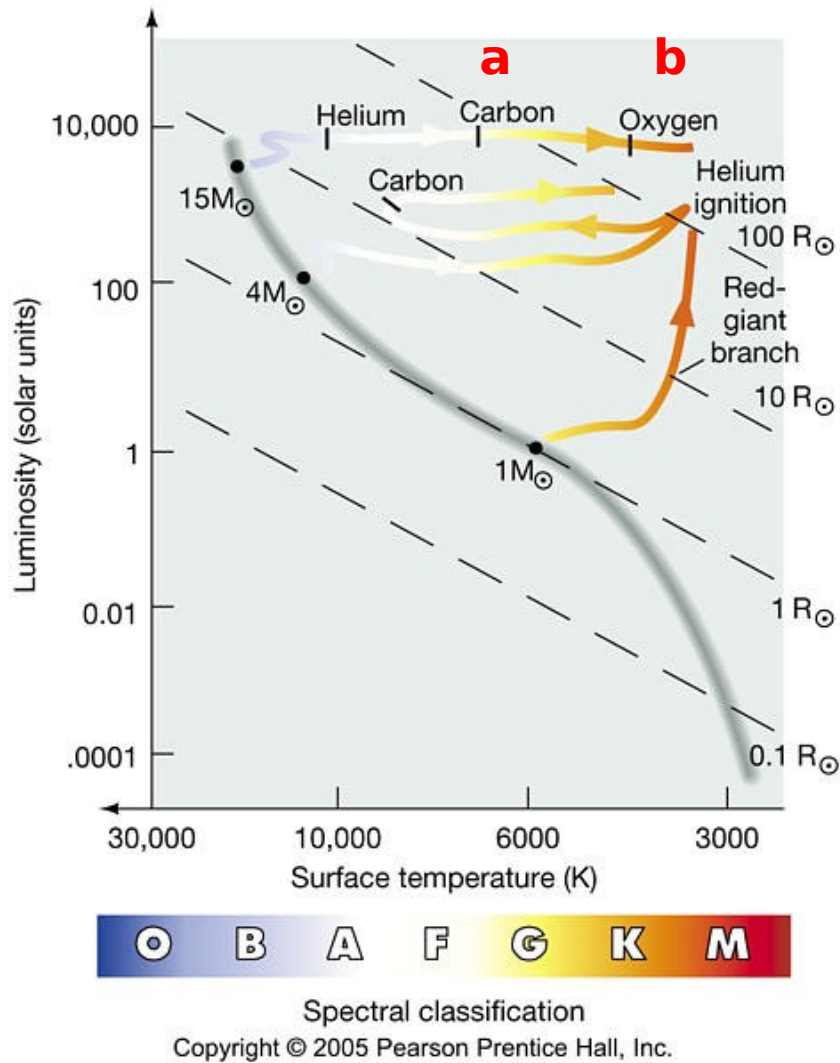
Cette évolution est régie par les variations de la production d'énergie dans leur intérieur.



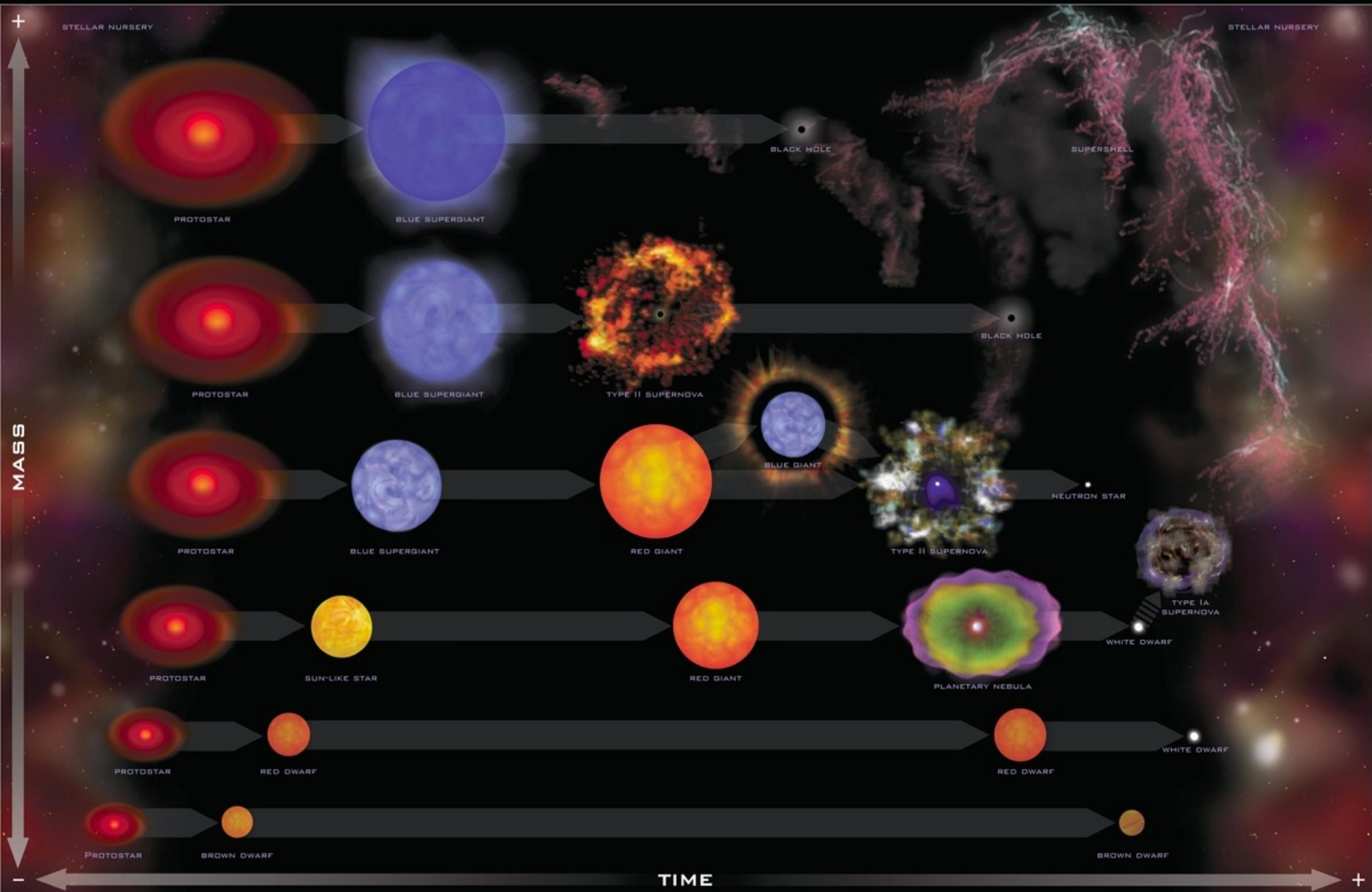
Résumé d'évolution stellaire



Résumé d'évolution stellaire



STELLAR EVOLUTION: A JOURNEY WITH CHANDRA



Hot topics : sujets d'actualité en physique stellaire

L'étude des étoiles et de leur évolution, leur compréhension dans les grandes lignes, est un sujet vieux de près de 70 ans.

Les modèles actuels permettent d'expliquer beaucoup d'observations, mais sont aussi mis en défaut par des données de qualité croissante et toujours plus nombreuses.

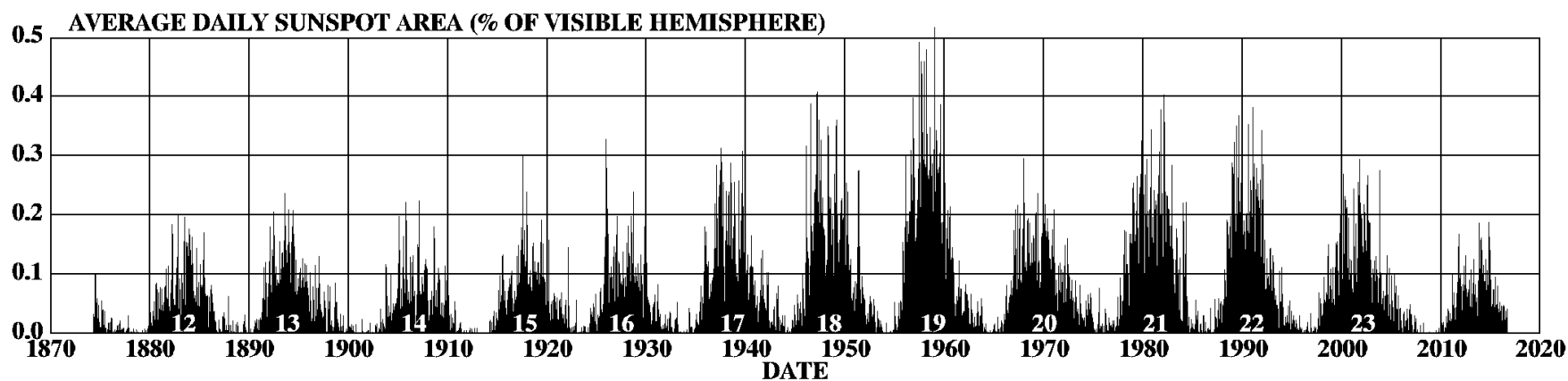
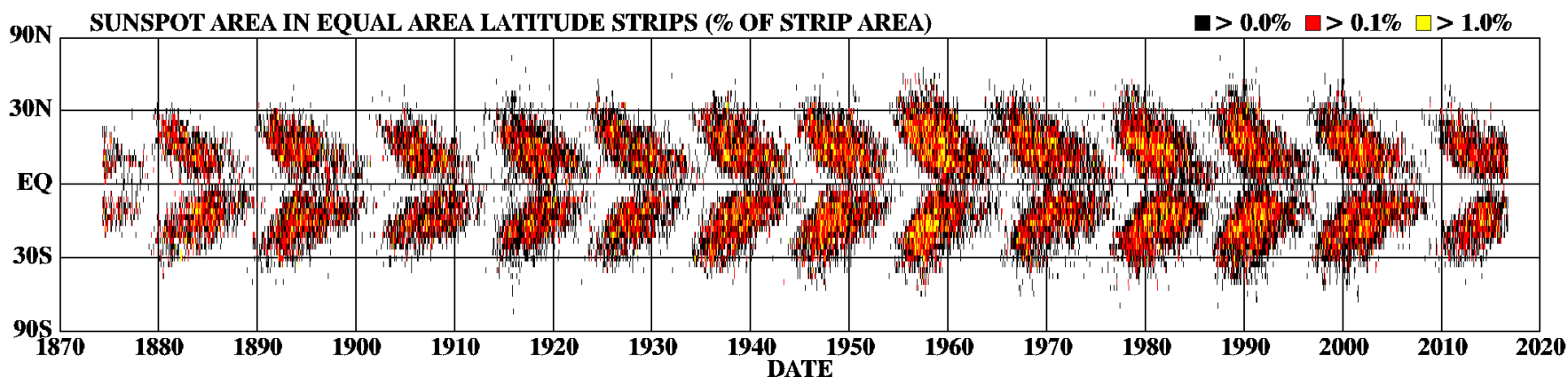
Voici quelques questions fondamentales qui attendent d'être résolues :

- ★ Comment est généré le champ magnétique des étoiles? Comment évolue-t-il?
- ★ Comment le champ magnétique affecte-t-il l'habitabilité des systèmes (exo)planétaires?
- ★ Connaît-on bien la structure et l'évolution des étoiles ?
- ★ Comment exactement les étoiles interagissent-elles avec leur environnement?

Hot topic 1 : le magnétisme stellaire

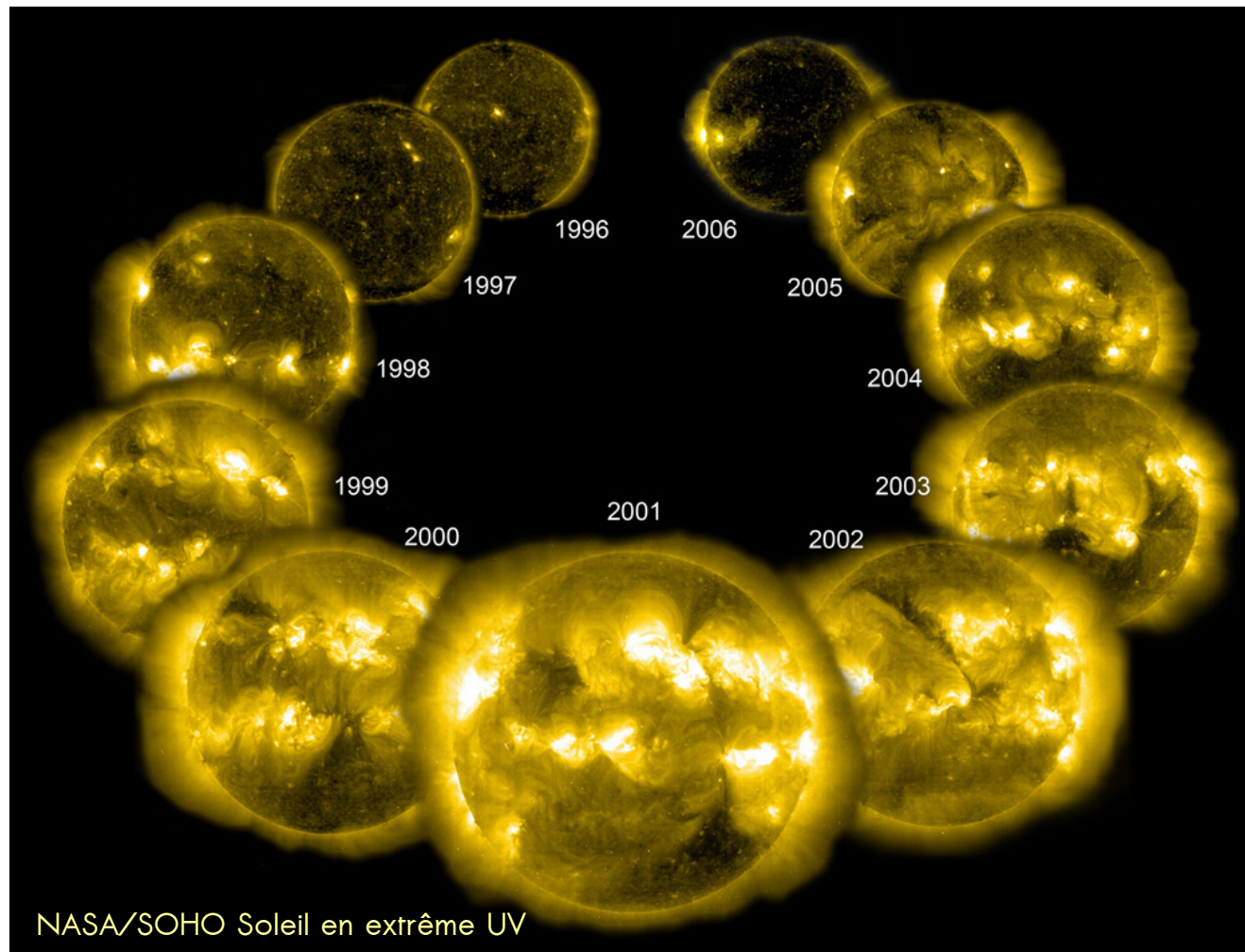
Le nombre et la position des taches solaires évoluent au cours du temps pour former ce que l'on appelle le *diagramme papillon*, qui révèle un cycle d'activité de 11 ans et une périodicité magnétique de 22 ans.

DAILY SUNSPOT AREA AVERAGED OVER INDIVIDUAL SOLAR ROTATIONS



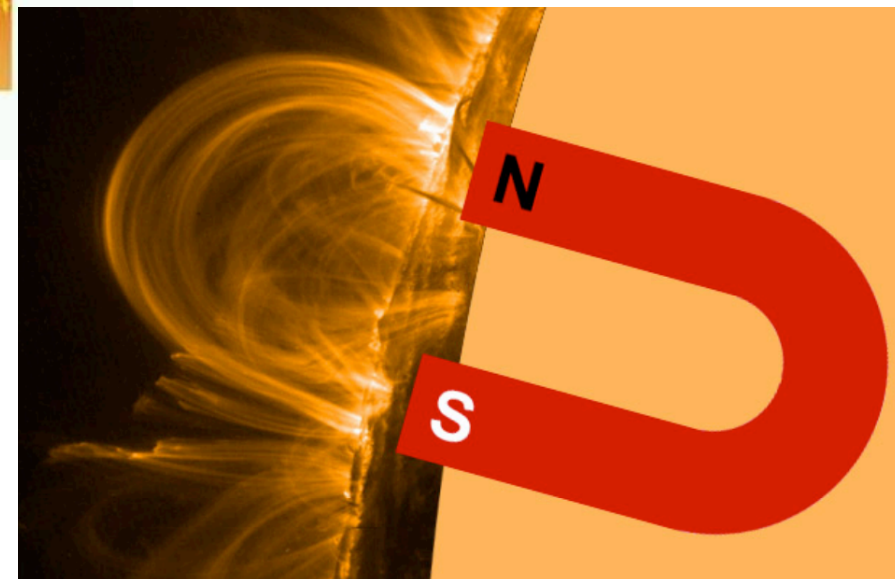
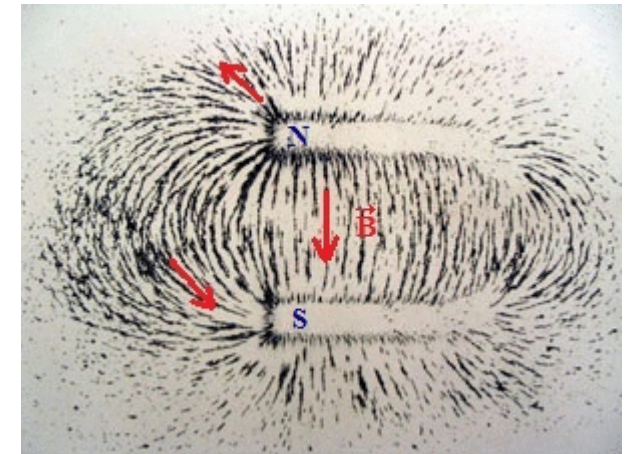
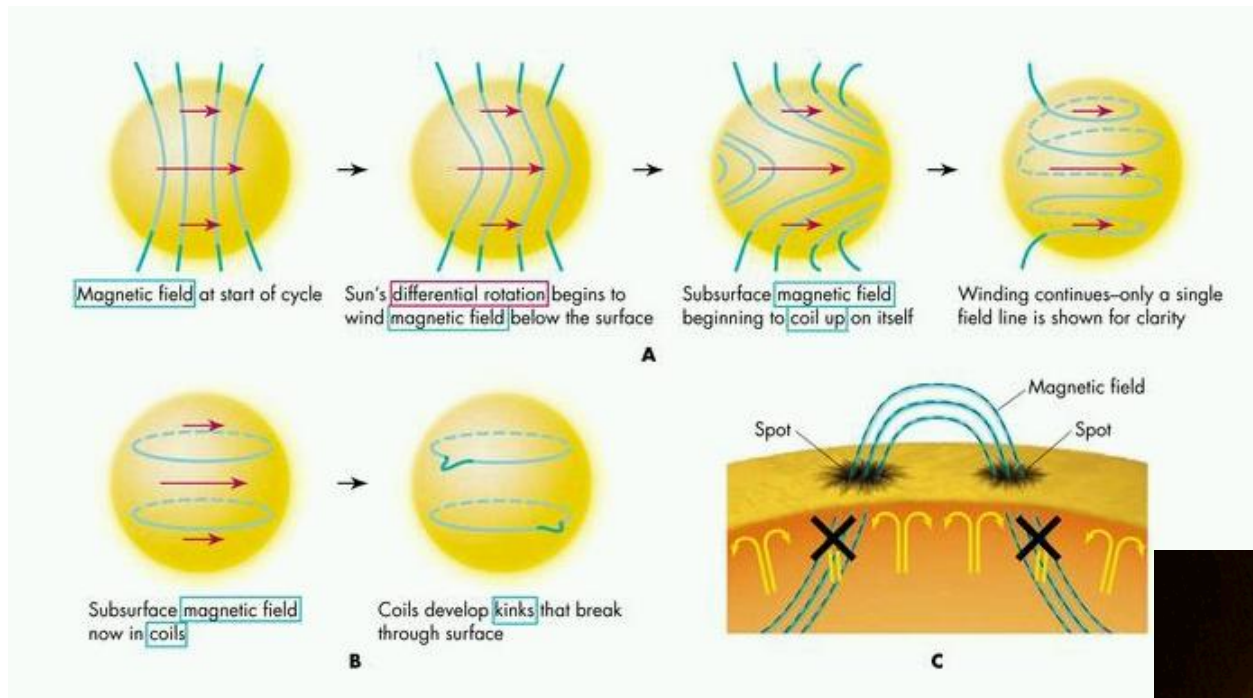
Hot topic 1 : le magnétisme stellaire

Le nombre et la position des taches solaires évoluent au cours du temps pour former ce que l'on appelle le *diagramme papillon*, qui révèle un cycle d'activité de 11 ans et une périodicité magnétique de 22 ans.



Hot topic 1 : le magnétisme stellaire

Le champ magnétique du Soleil et le cycle d'activité sont bien modélisés par un effet dynamo appelé dynamo $\alpha-\Omega$

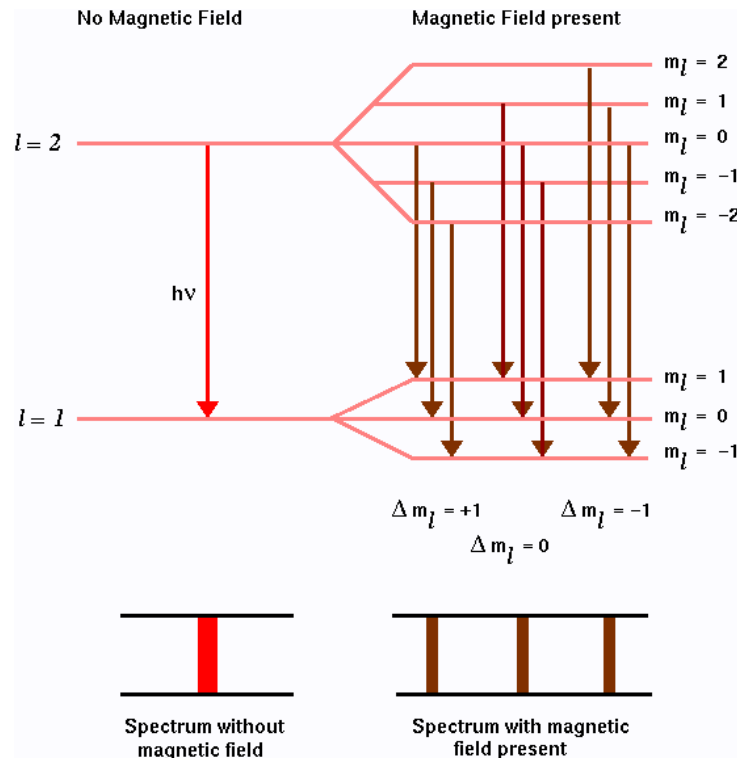


Hot topic 1 : le magnétisme stellaire

Pour les autres étoiles, la tâche est plus ardue car on ne voit pas directement leur surface.

On utilise une technique indirecte appelée *imagerie Zeeman-Doppler* pour reconstruire la géographie des taches de surface dans les étoiles autres que le Soleil.

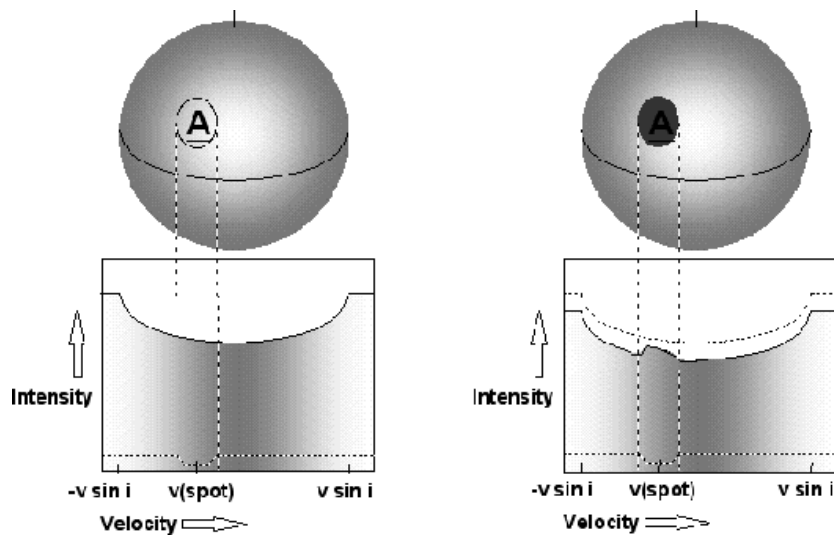
Effet Zeeman



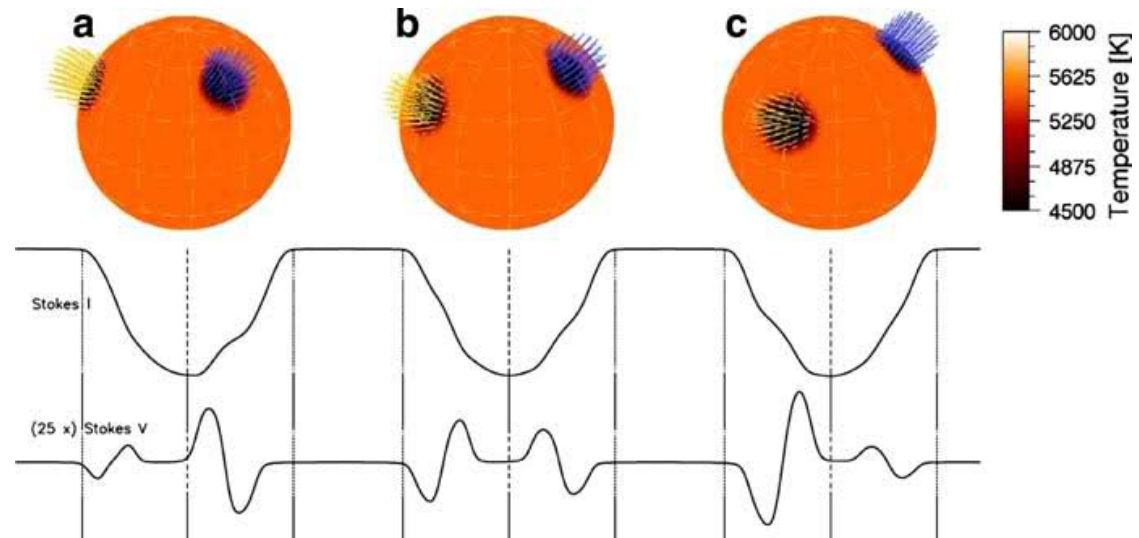
Hot topic 1 : le magnétisme stellaire

L'effet Zeeman s'accompagne d'une polarisation de la lumière. En plus de l'intensité lumineuse, on peut donc aussi étudier la polarisation de la lumière des étoiles magnétisées → *spectropolarimétrie*

Déformation des raies du spectre par la présence de taches



Déformation du profil de polarisation linéaire par la présence de taches magnétiques



Hot topic 1 : le magnétisme stellaire

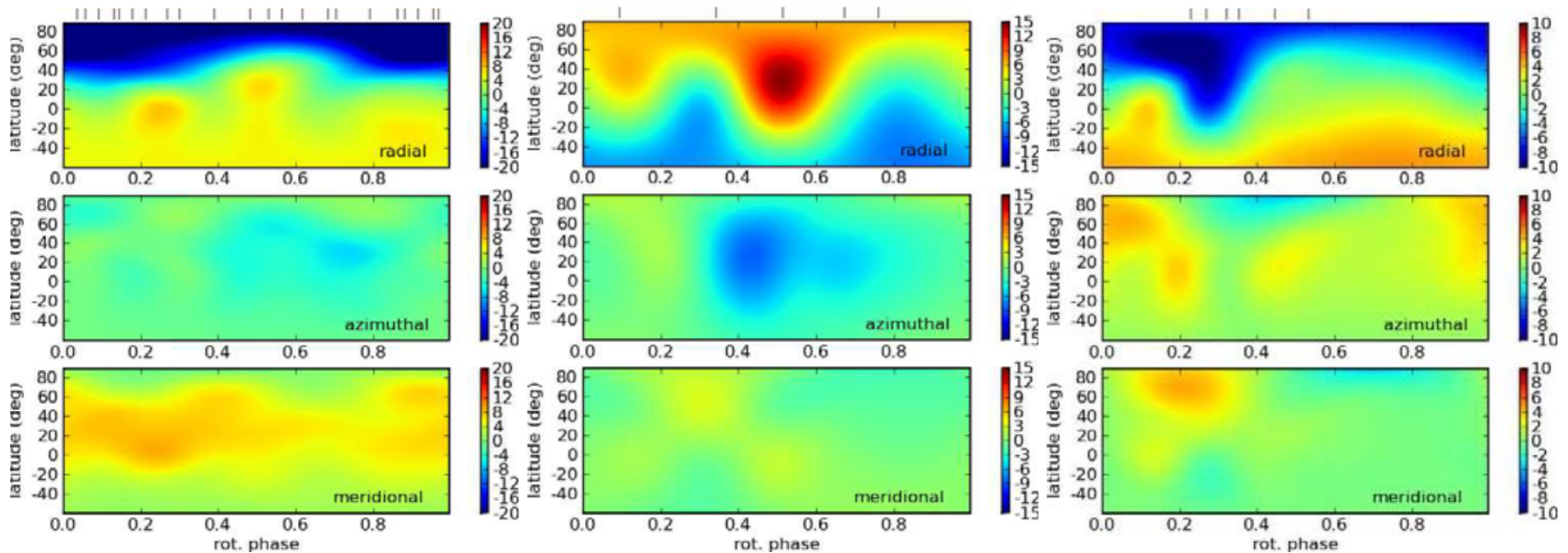


Hot topic 1 : le magnétisme stellaire

Beaucoup d'indicateurs de magnétisme pour les étoiles de faible masse.

Génération du champ magnétique par processus dynamo (type solaire ou autre).

Question de l'existence systématique de cycles d'activité

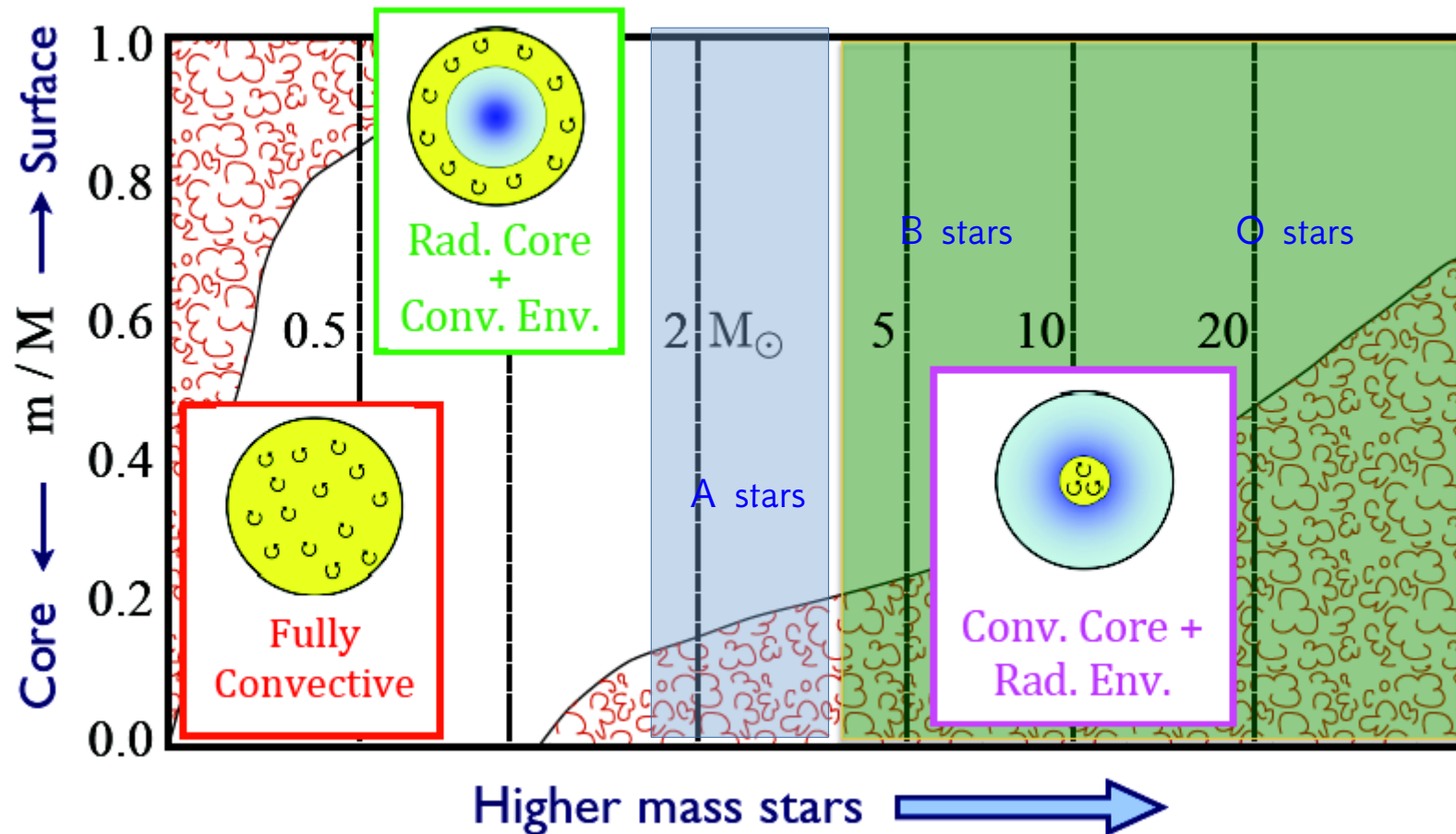


g. 2 (online colour at: www.an-journal.org) Magnetic maps of HD 78366, derived from 2008.09, 2010.04, and 2011.08 observations (from left to right). For each data set, the 3 charts illustrate the field projection onto one axis of the spherical coordinate frame with, from top to bottom, the radial, azimuthal, and meridional field components. The magnetic field strength is expressed in Gauss.

Hot topic 1 : le magnétisme stellaire

~ 7-10 % des étoiles O, B et A présentent des champs magnétiques intenses à grande échelle.

Le mécanisme de génération reste flou.



Hot topic 1 : le magnétisme stellaire

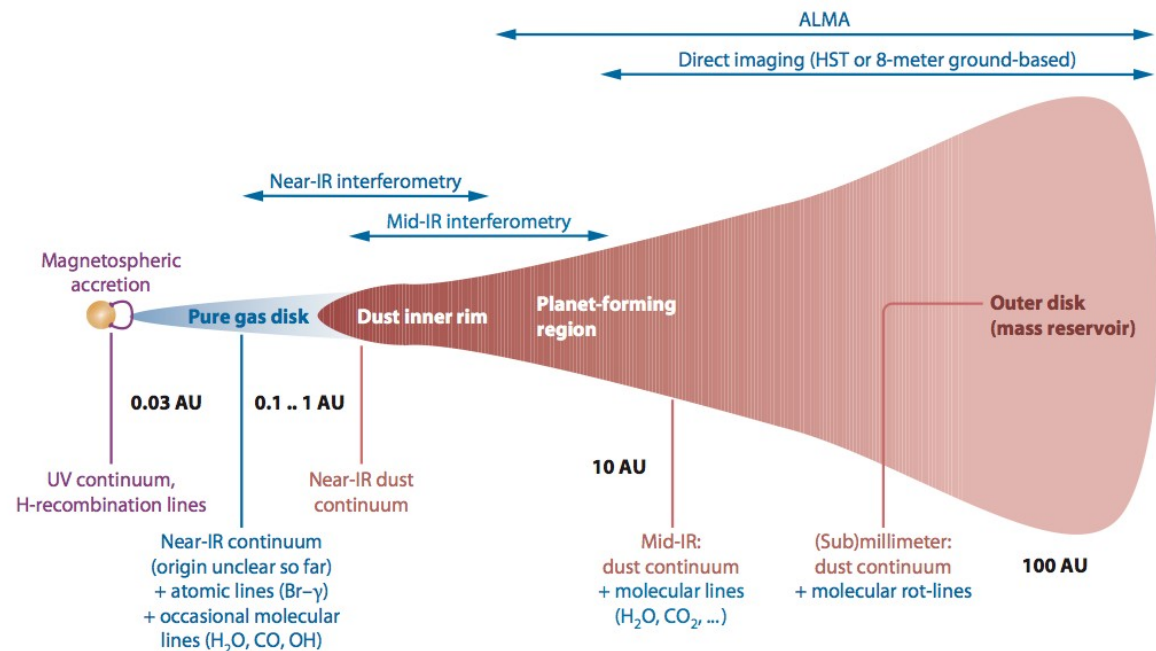
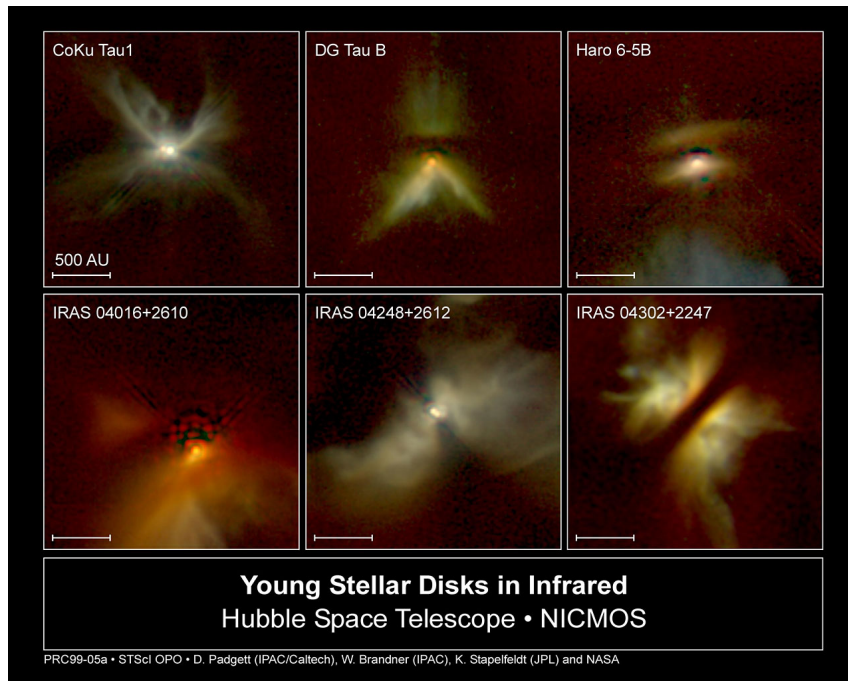


Hot topic 2 : Interaction étoile-environnement

Les étoiles interagissent avec leur environnement tout au long de leur vie.

Lors des premières phases de l'évolution, les étoiles nouvellement nées sont couplées à un disque de gaz et de poussière dans lequel se formeront les planètes.

La physico-chimie en jeu dans ces disques et leur évolution reste encore mal comprise

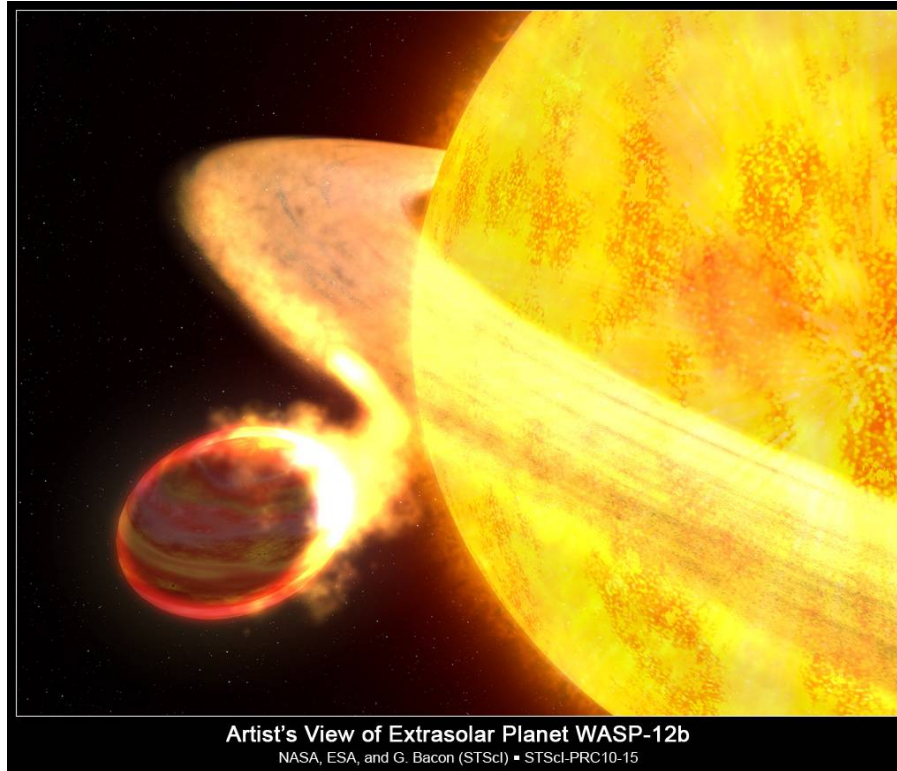


Hot topic 2 : Interaction étoile-environnement

Bien que ce disque se dissipe après quelques millions d'années seulement, les interactions entre les étoiles et leur système planétaire restent importantes.

Leur importance sur l'habitabilité des planètes est encore largement à investiguer.

Effets de marée



Interactions magnétiques

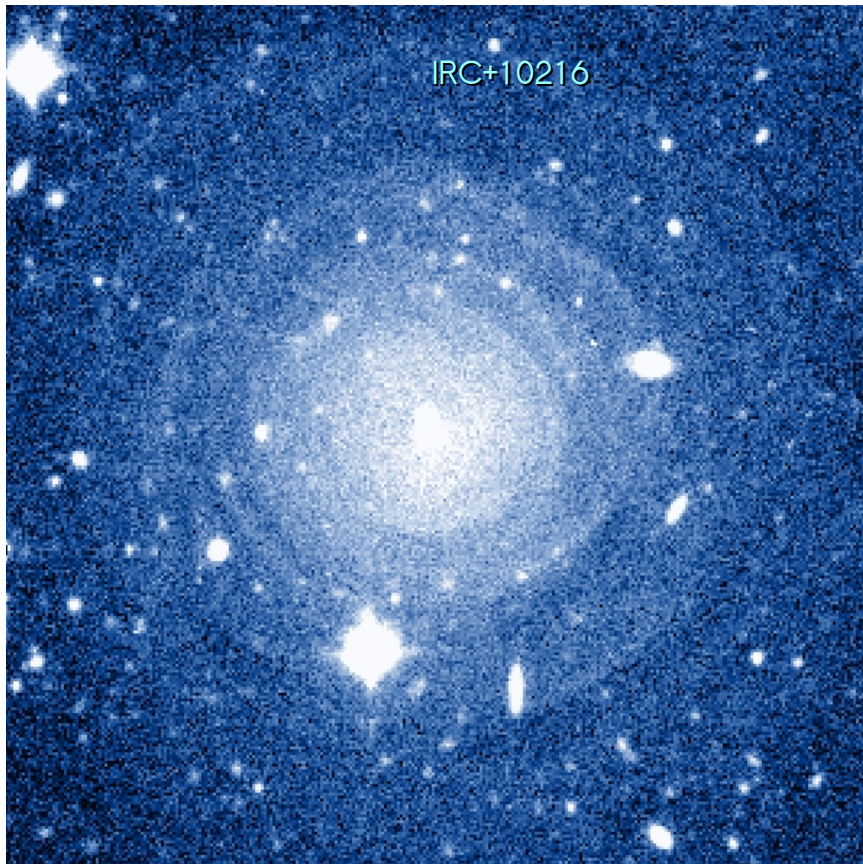


(Mark A. Garlick/markgarlick.com)

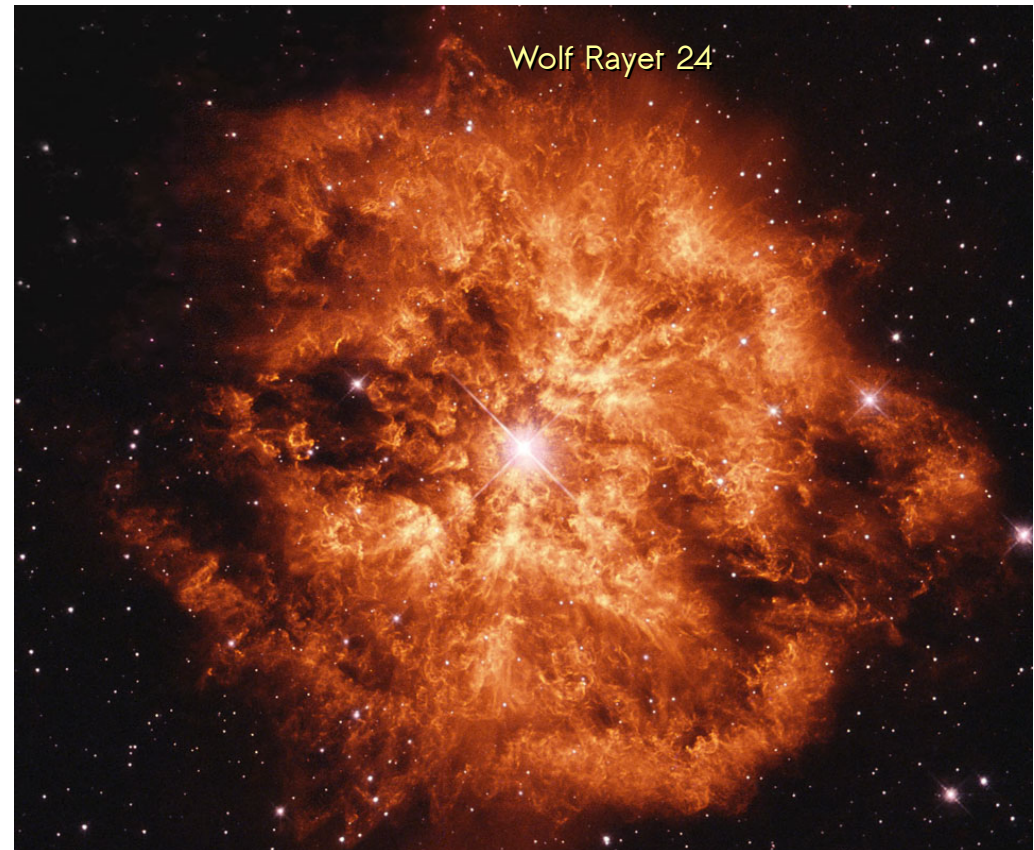
Hot topic 2 : Interaction étoile-environnement

Les étoiles les plus lumineuses interagissent fortement avec leur milieu environnant via des vents stellaires.

C'est à travers ce mécanisme que les éléments chimiques produits dans les étoiles par les différents processus nucléosynthétiques sont rejetés dans le milieu interstellaire et conduisent ainsi à un enrichissement en éléments lourds de l'Univers.



Géante rouge - Étoile peu massive



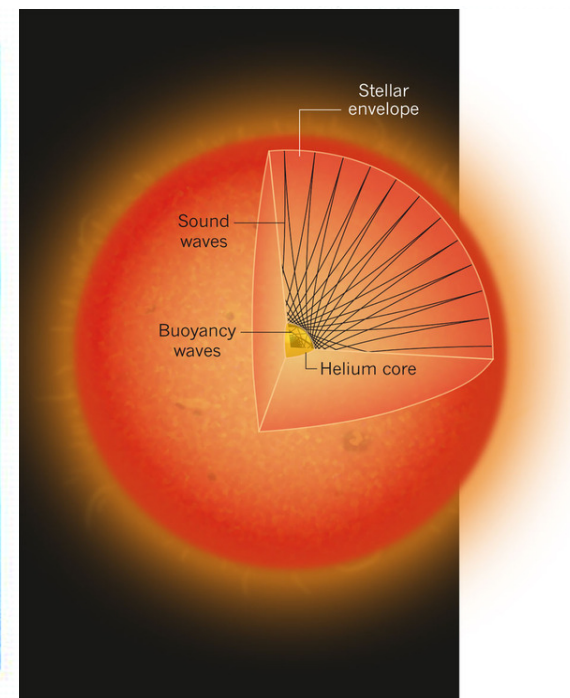
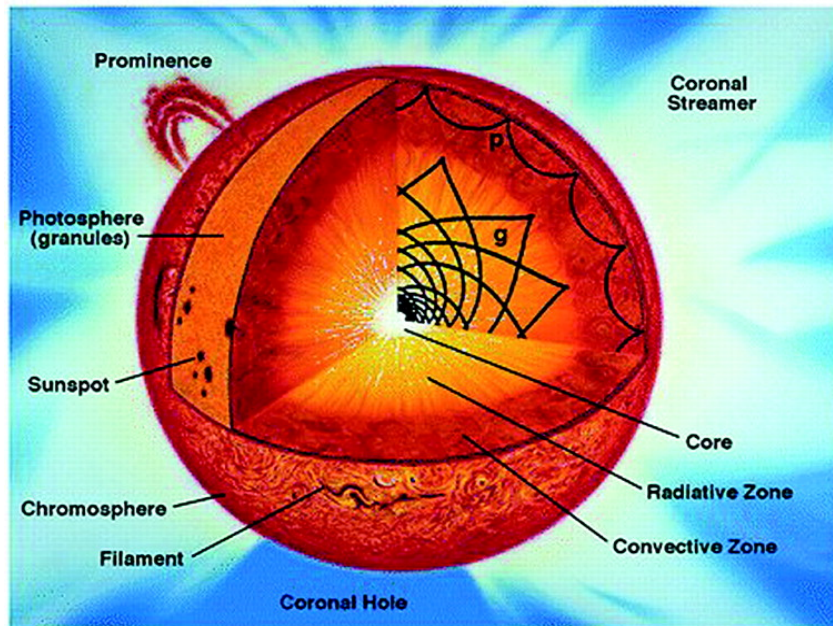
Hubble Legacy Archive, NASA, ESA

Étoile Wolf-Rayet - Étoile massive

Hot topic 3 : Structure interne des étoiles

Bien qu'il existe une théorie claire pour décrire la structure interne des étoiles, celle-ci dépend de tant d'ingrédients physiques, qu'il reste difficile de produire aujourd'hui des modèles intrinsèquement complètement fiables.

Au cours de la dernière décennie, les satellites de photométrie haute précision Kepler et CoRoT, principalement conçus pour la recherche d'exoplanètes, ont permis l'essor de *l'astérosismologie*, et apporté de nombreuses contraintes inédites sur la structure interne des étoiles.

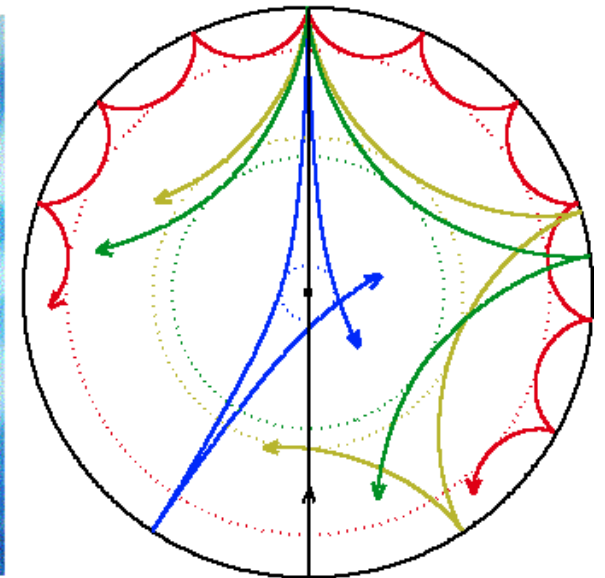
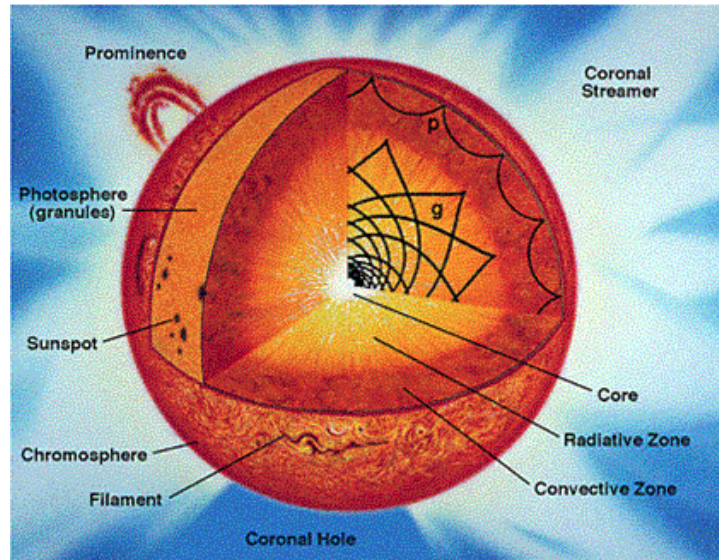
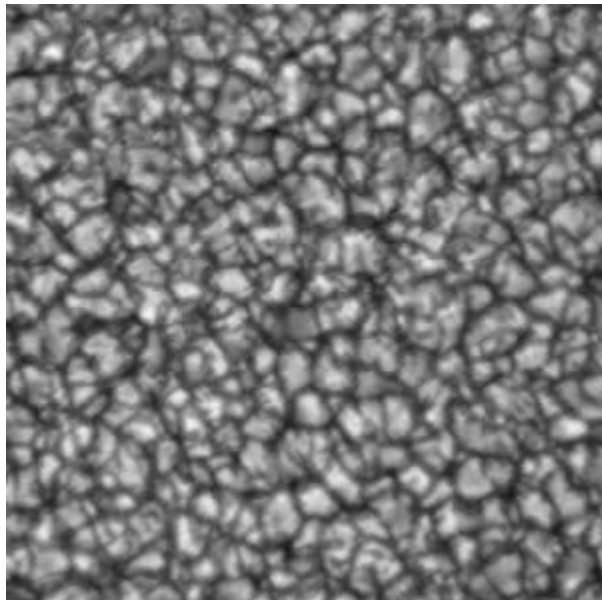


Hot topic 3 : Structure interne des étoiles

Les mouvements turbulents de matière dans les étoiles comme le Soleil les font vibrer.

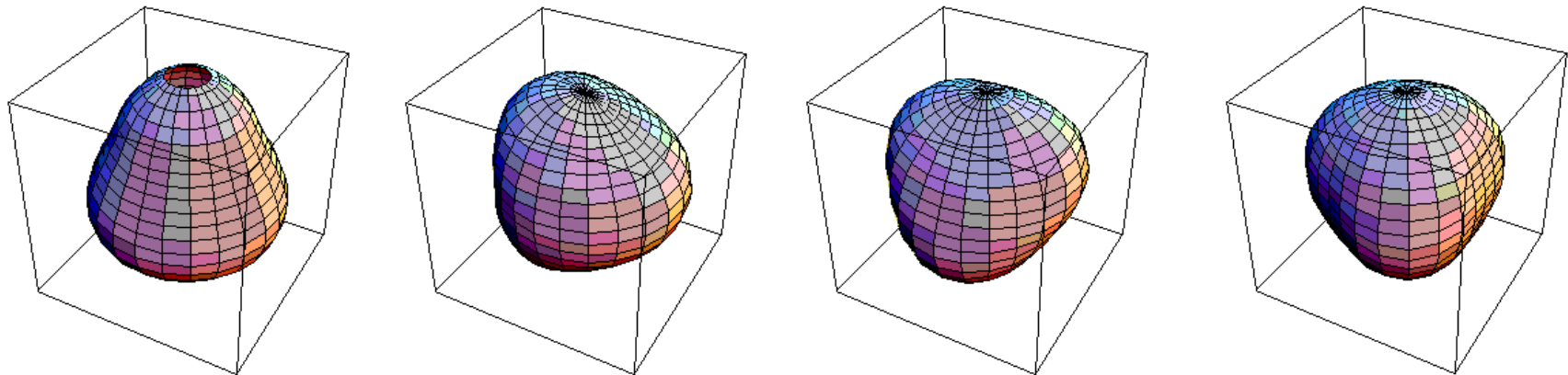
Des ondes acoustiques et de gravité se propagent dans leur intérieur.

On utilise la propagation de ces ondes pour sonder l'intérieur du Soleil : on parle alors d'*héliosismologie*



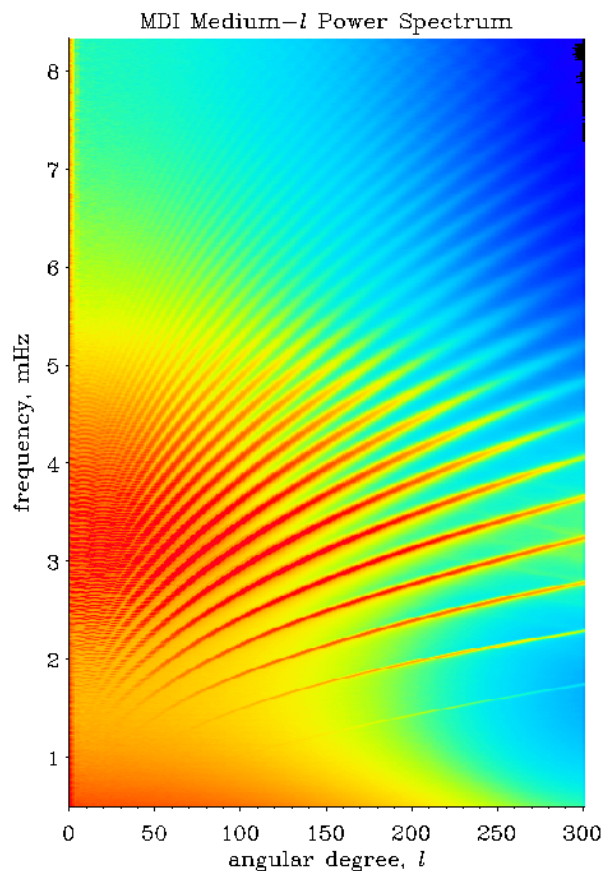
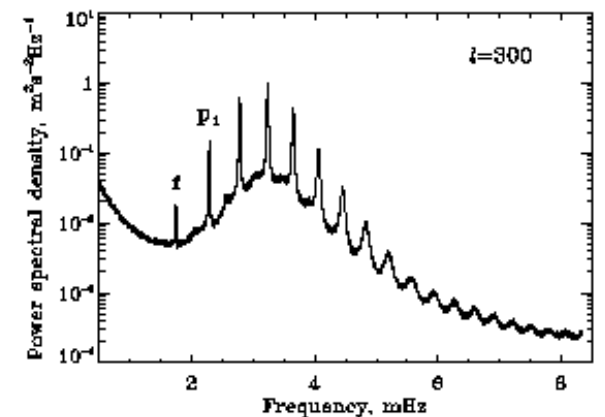
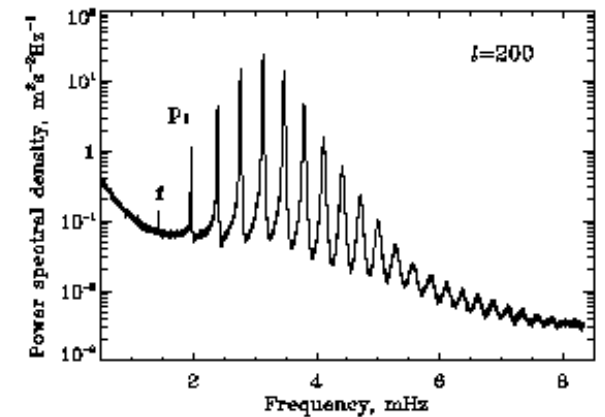
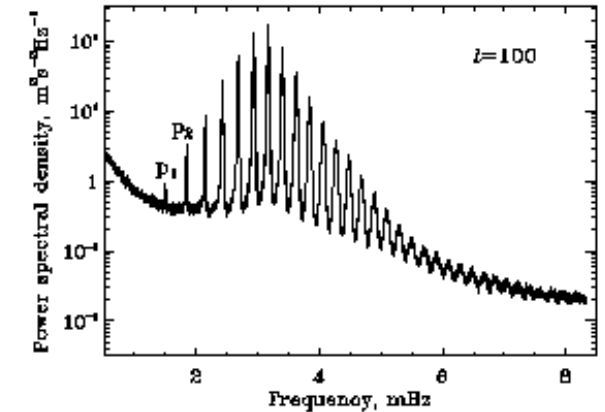
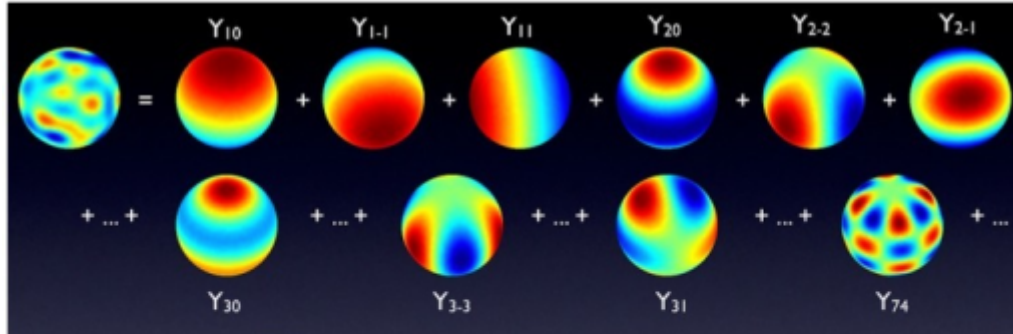
Hot topic 3 : Structure interne des étoiles

Analyse du spectre de puissance par décomposition sur des harmoniques sphériques



Hot topic 3 : Structure interne des étoiles

Analyse du spectre de puissance par décomposition sur des harmoniques sphériques $Y_{l,m,n}$

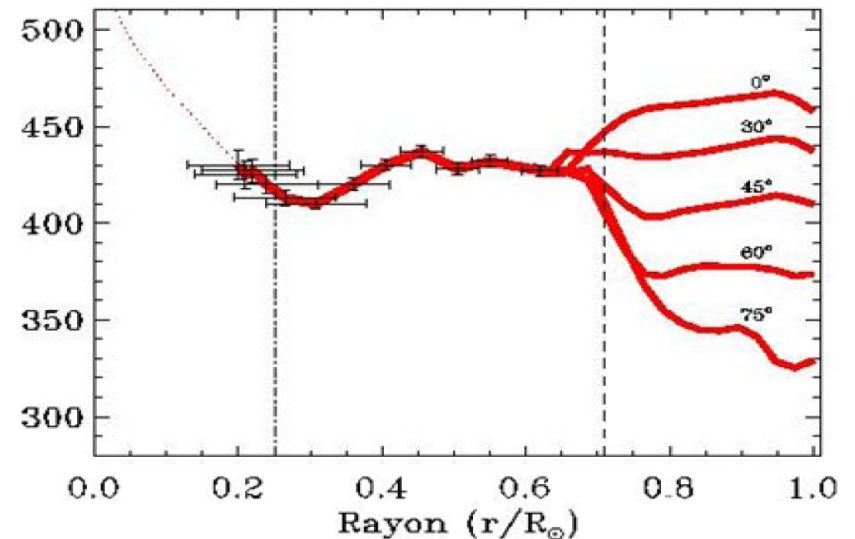
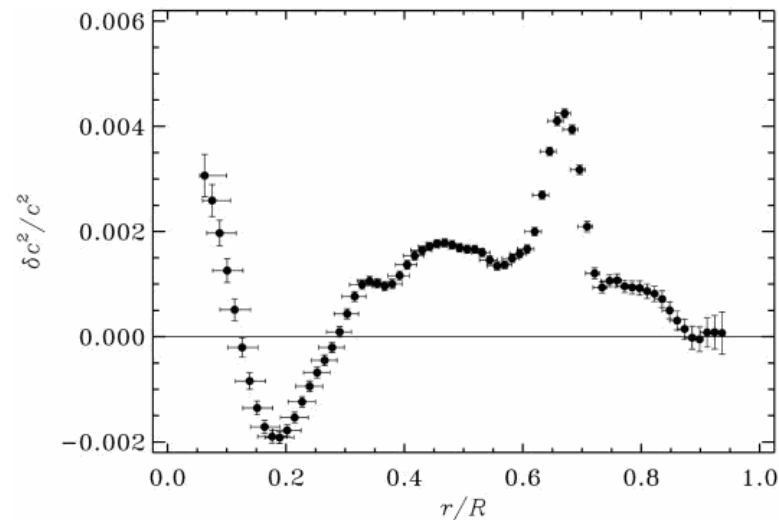


Spectre de puissance du Soleil révélé par SOHO

Hot topic 3 : Structure interne des étoiles

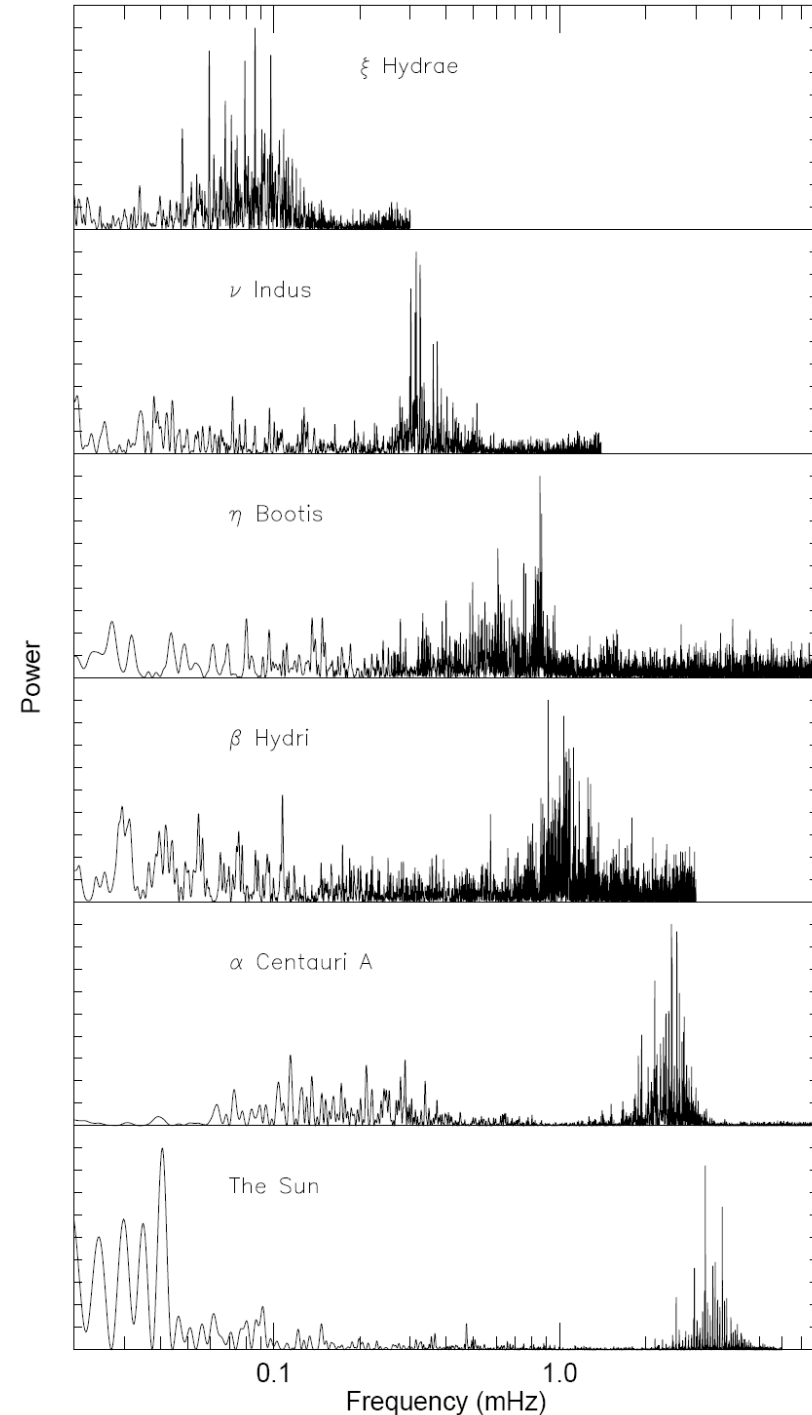
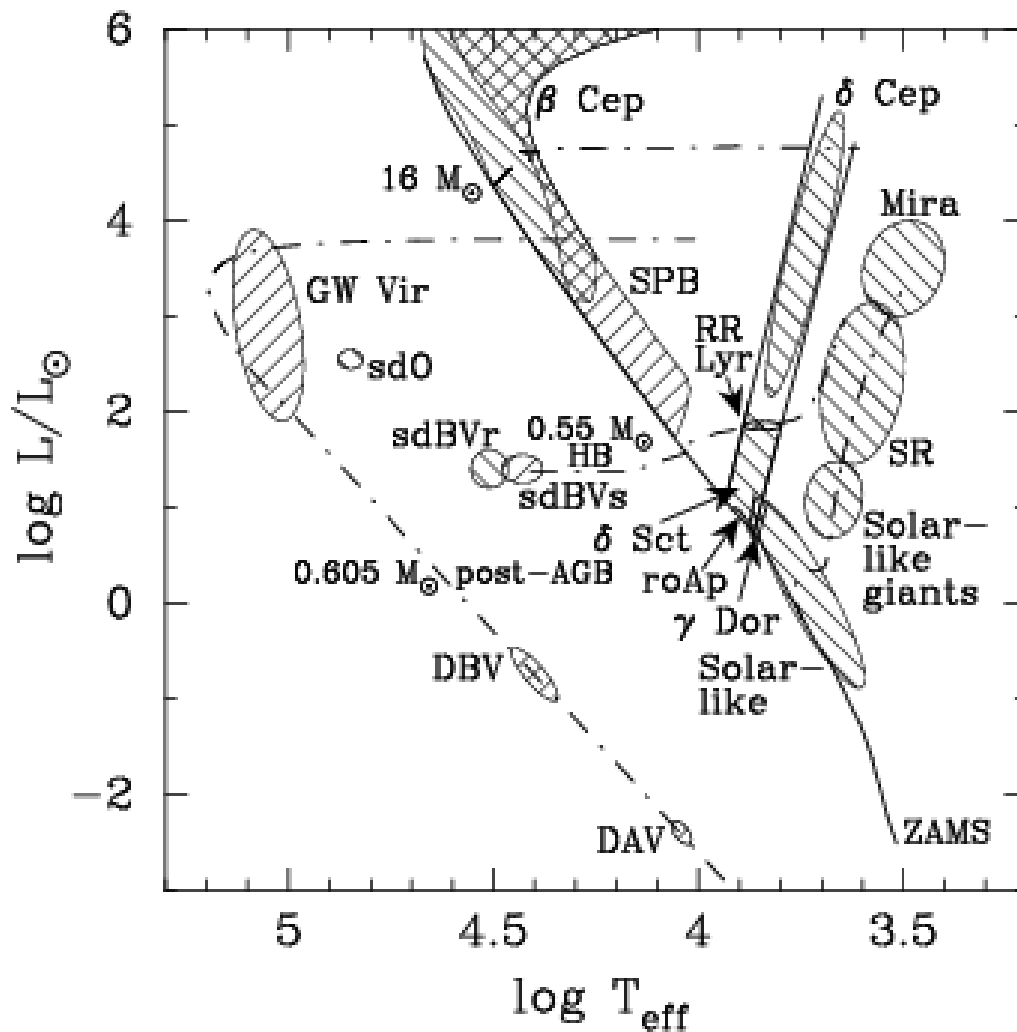
L'inversion des fréquences constitue une sonde unique de l'intérieur solaire et contraint:

- la profondeur de l'enveloppe convective
- la stratification en densité
- l'abondance d'hélium
- l'équation d'état du plasma solaire
- les réactions nucléaires
- la rotation interne



Hot topic 3 : Structure interne des étoiles

On trouve des oscillations stellaires un peu dans tous types d'étoiles, mais les spectres d'oscillation ne sont pas aussi riches d'informations que celui du Soleil

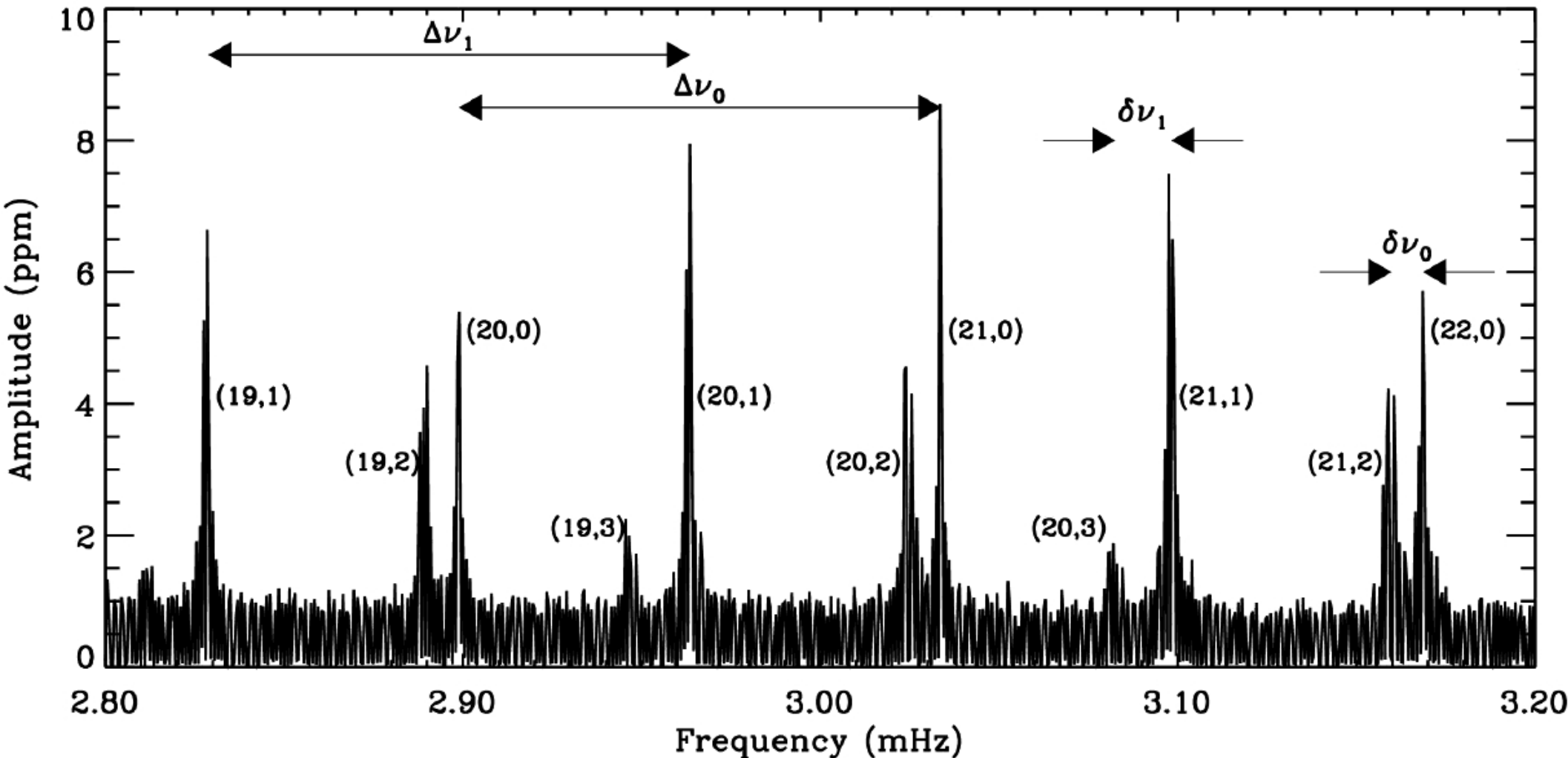


Hot topic 3 : Structure interne des étoiles

Pour les étoiles autres que le Soleil on analyse le spectre d'oscillation en ces termes :

Fréquence d'amplitude maximale, grande séparation, petite séparation

$$\Delta\nu_{n,l} = \nu_{n,l} - \nu_{n-1,l} \quad \delta\nu_{l,l+2} = \nu_{nl} - \nu_{n-1,l+2} \simeq -(4l+6) \frac{\Delta\nu_0}{4\pi^2\nu_{nl}} \int_0^R \frac{dc}{dr} \frac{dr}{r} \quad \Delta\nu_0 = \left[2 \int_0^R \frac{dr}{c} \right]^{-1}$$



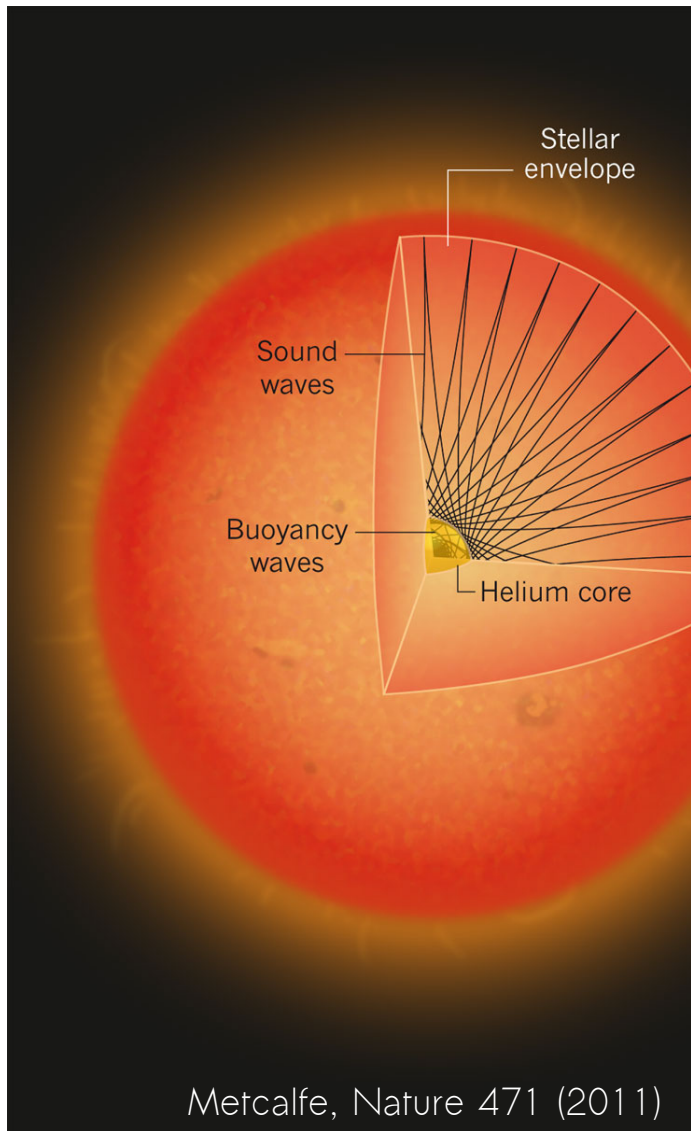
Hot topic 3 : Structure interne des étoiles

On a découvert des oscillations de type solaire dans les géantes rouges.

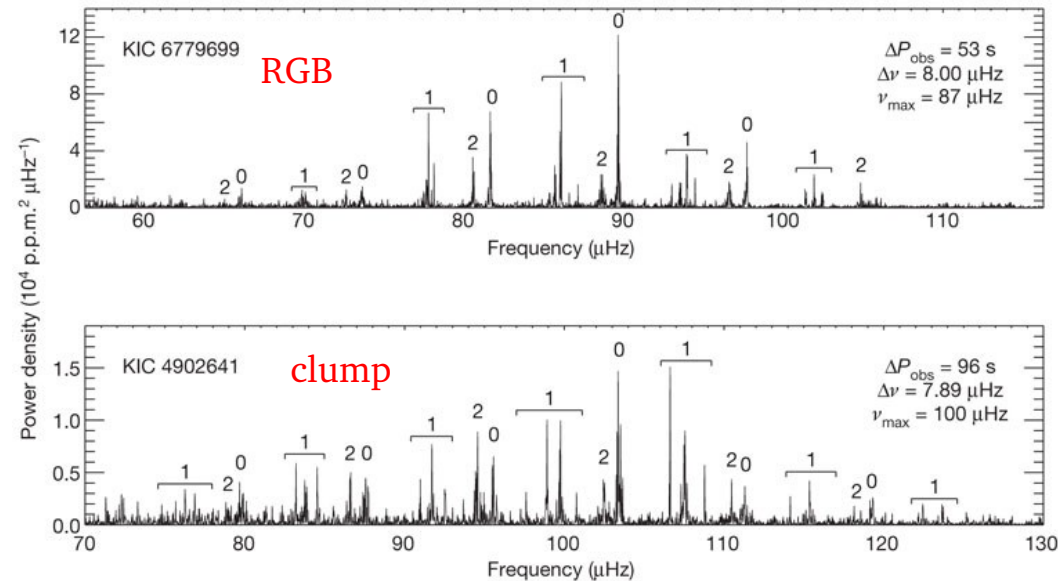
Ces oscillations correspondent pour ces étoiles à des oscillations acoustiques mais aussi des oscillations dites mixtes générées par la propagation d'ondes p et g dans des cavités communes

→ elles permettent de sonder le coeur des géantes

rouges !



Metcalfé, Nature 471 (2011)



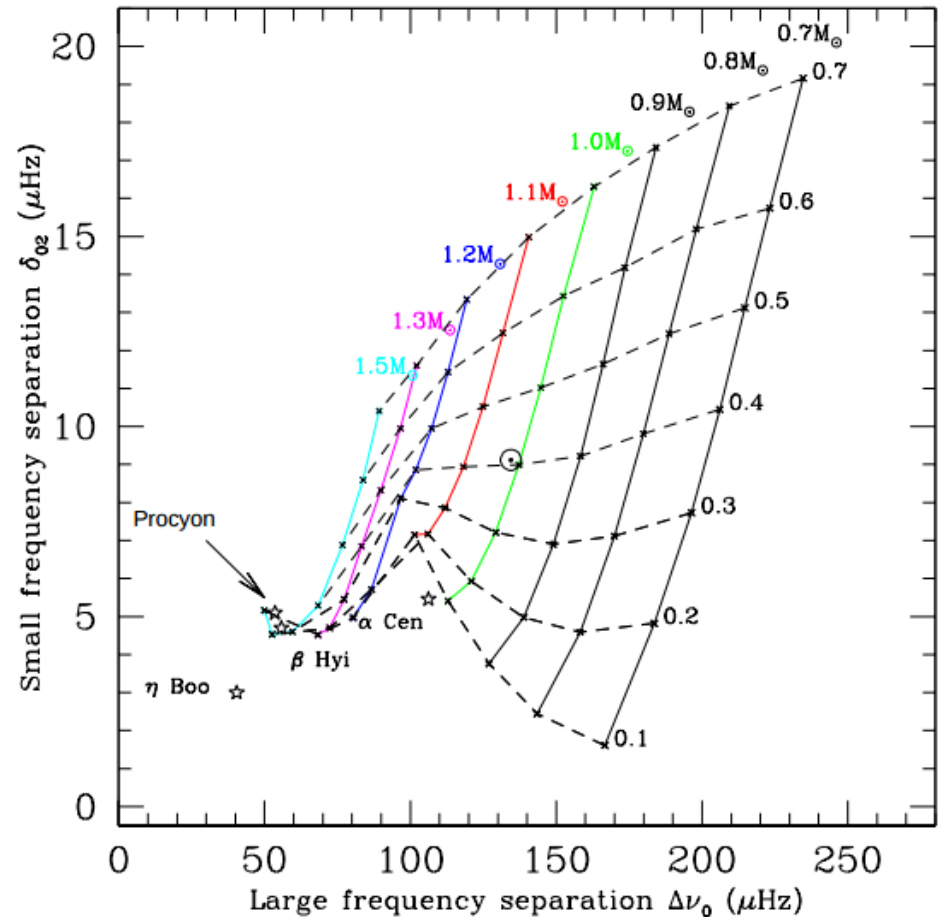
Hot topic 3 : Structure interne des étoiles

Ces paramètres sont liés à des paramètres fondamentaux de l'étoile : sa masse, son rayon, sa gravité de surface, séparation des périodes des modes de gravité

$$\Delta\nu_{\text{scale}} = \Delta\nu_{\odot} \left(\frac{M}{M_{\odot}}\right)^{0.5} \left(\frac{R}{R_{\odot}}\right)^{-1.5} \quad A_{\text{max}}/A_{\text{max},\odot} = \frac{(L/L_{\odot})^s}{(M/M_{\odot})^t} \left(\frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{eff},\odot}}\right)^{-r} \quad \nu_{\text{max}} = \nu_{\text{max},\odot} \left(\frac{M}{M_{\odot}}\right) \left(\frac{R}{R_{\odot}}\right)^{-2} \left(\frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{eff},\odot}}\right)^{-0.5}$$

Ces grandeurs varient au cours de l'évolution notamment :

Evolution sur la séquence principale de la petite séparation en fonction de la grande séparation

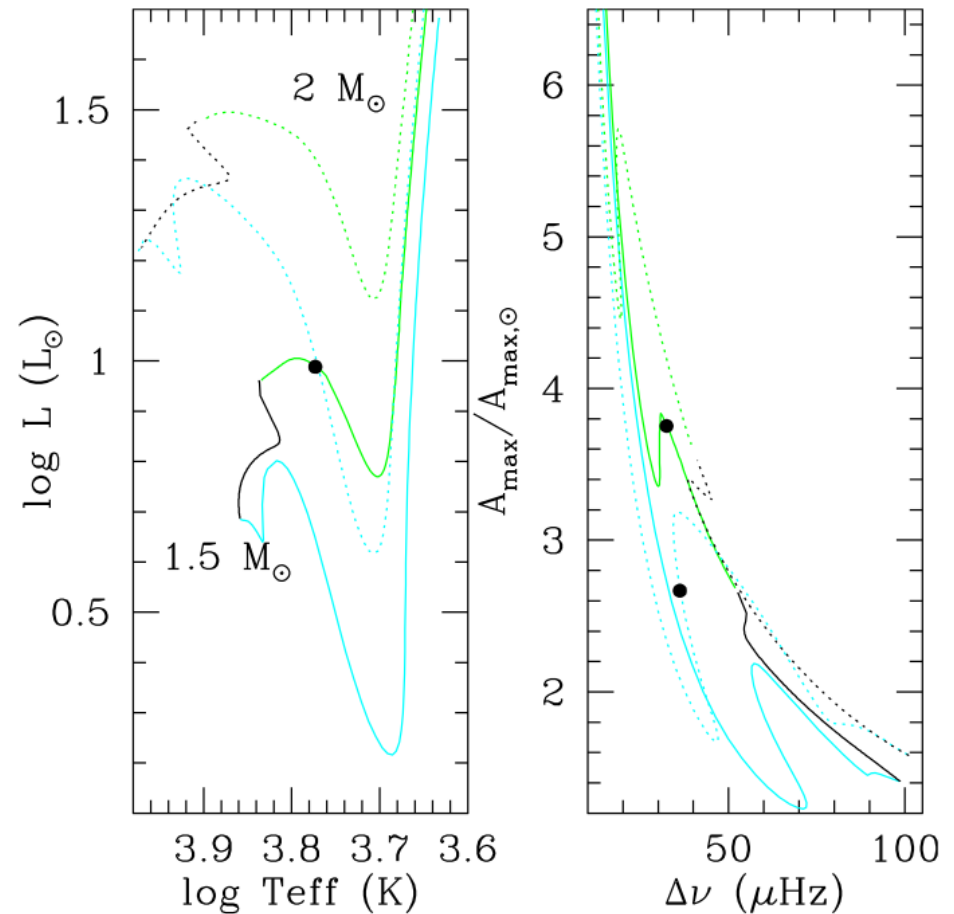
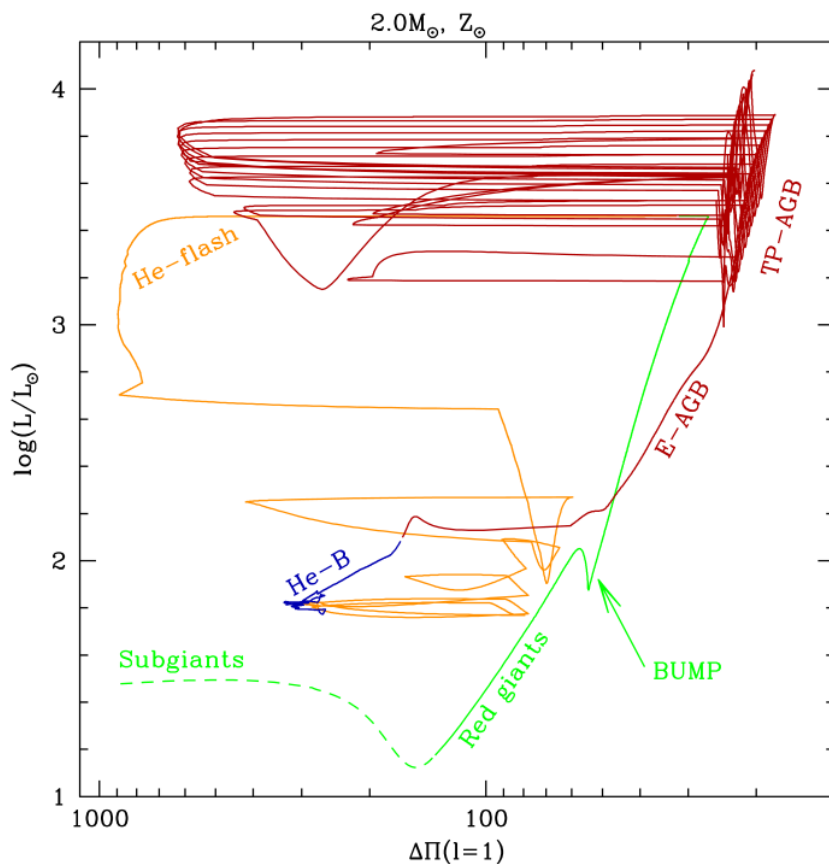


Hot topic 3 : Structure interne des étoiles

Ces paramètres sont liés à des paramètres fondamentaux de l'étoile : sa masse, son rayon, sa gravité de surface, séparation des périodes des modes de gravité

$$\Delta v_{\text{scale}} = \Delta v_{\odot} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{0.5} \left(\frac{R}{R_{\odot}} \right)^{-1.5} \quad A_{\text{max}}/A_{\text{max},\odot} = \frac{(L/L_{\odot})^s}{(M/M_{\odot})^t} \left(\frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{eff},\odot}} \right)^{-r} \quad v_{\text{max}} = v_{\text{max},\odot} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right) \left(\frac{R}{R_{\odot}} \right)^{-2} \left(\frac{T_{\text{eff}}}{T_{\text{eff},\odot}} \right)^{-0.5}$$

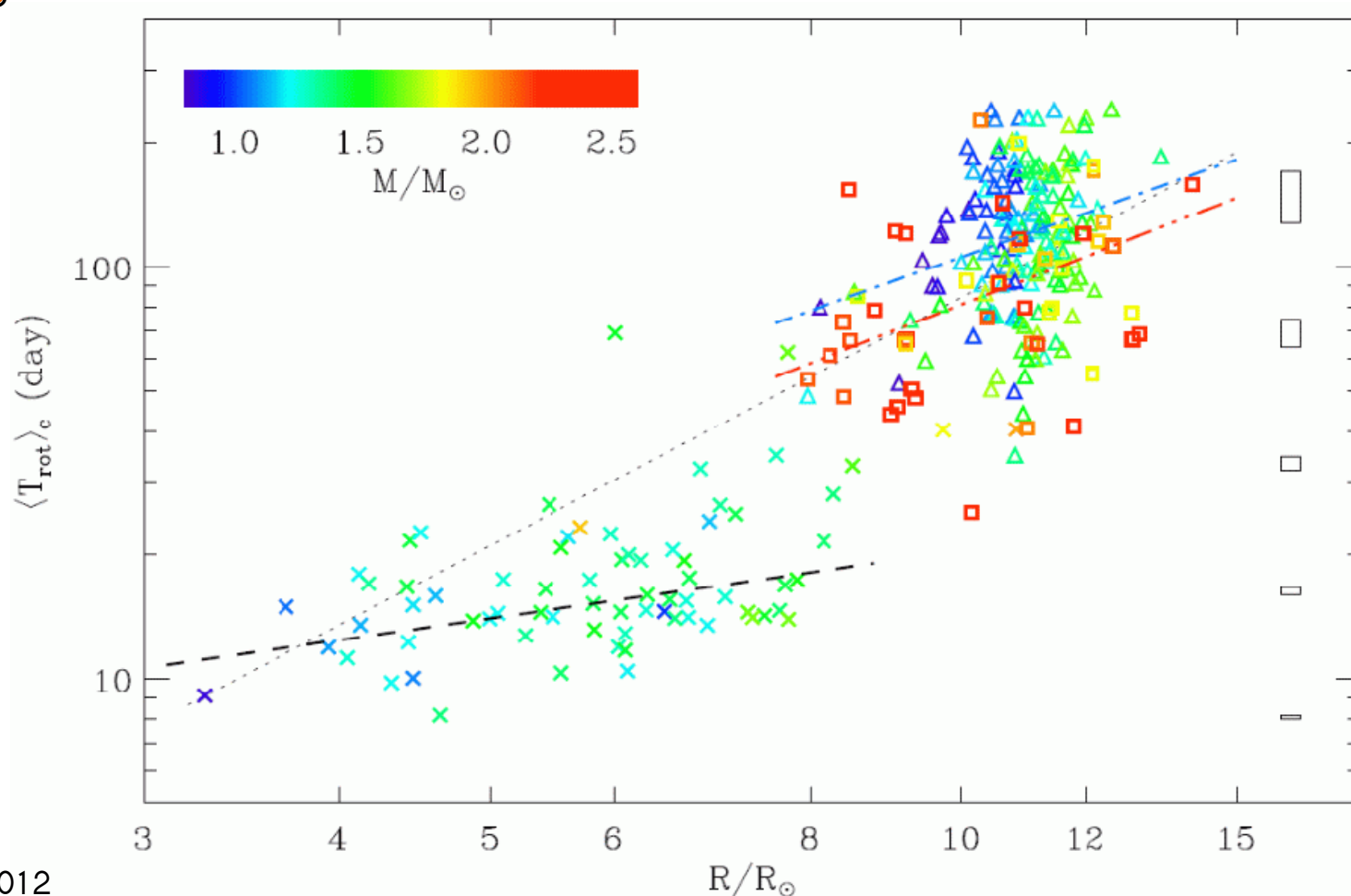
Ces grandeurs varient au cours de l'évolution notamment :



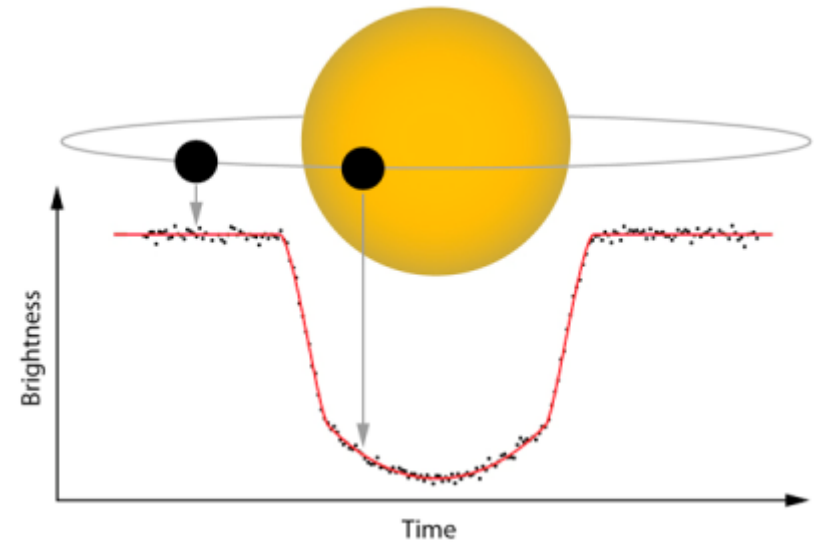
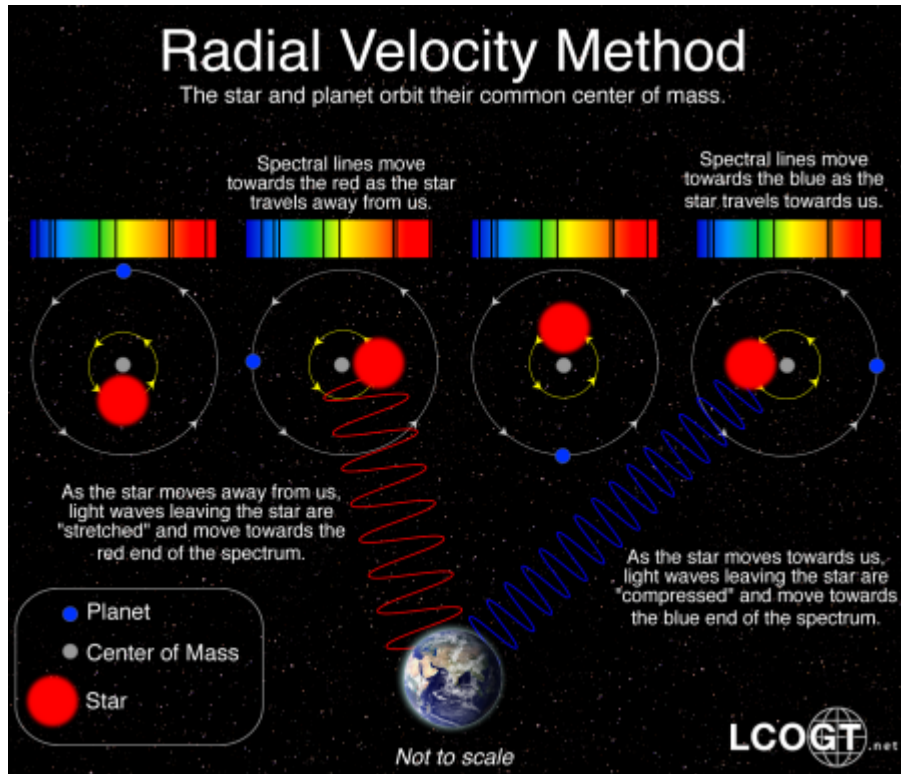
Hot topic 3 : Structure interne des étoiles

Bien que l'exploitation des données d'astérosismologie soit plus difficile que celle des données héliosismiques, cette technique nous donne accès à des informations jusqu'ici impossibles à vérifier observationnellement

Un des résultats majeurs : *détermination du taux de rotation moyen au cœur des étoiles géantes rouges*

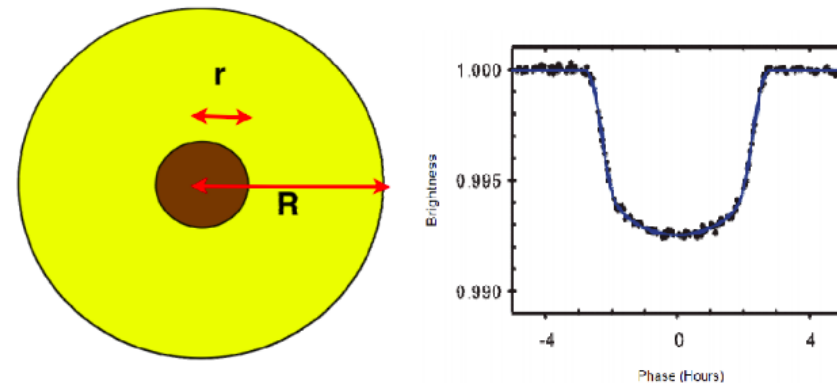


Hot topic 3+ : Des étoiles pour étudier les planètes



Méthodes des transits

Méthode des vitesses radiales

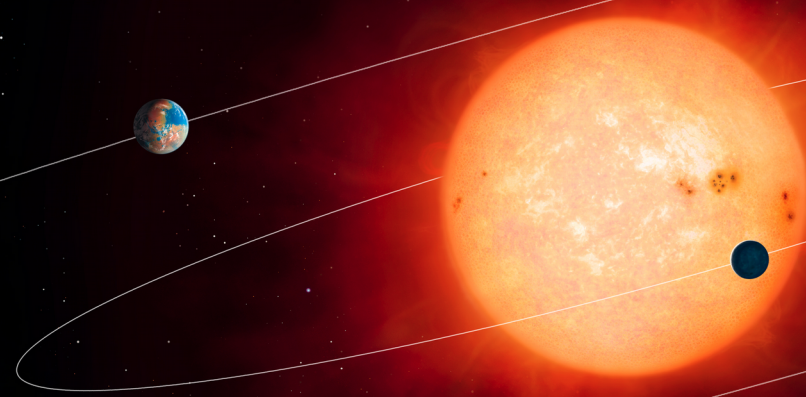
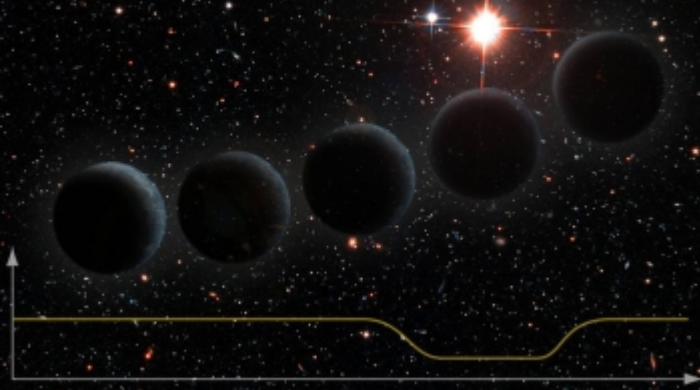


$$\text{Drop} = r^2 / R^2$$

esa

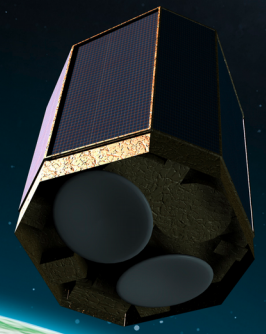
PLATO

Next-generation Planet Finder

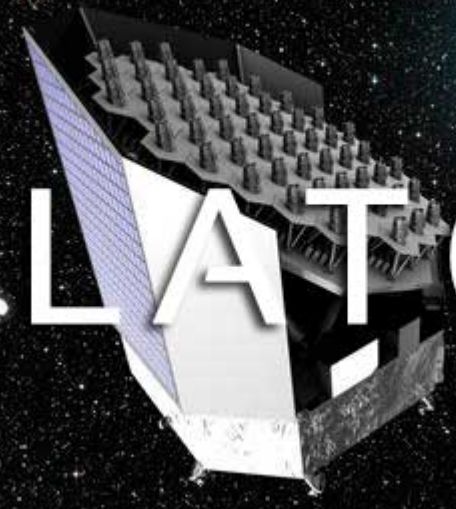


Nouvelle mission de l'ESA pour détecter des exoterres autour d'étoiles comme le Soleil et étudier l'évolution des systèmes planétaires

Lancement : 2026

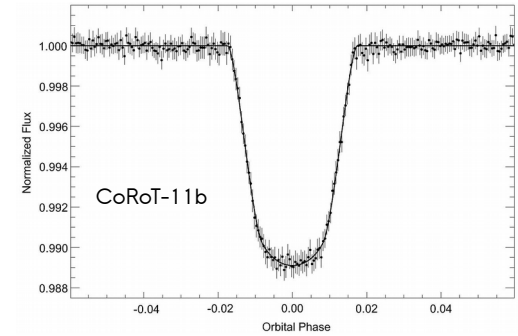
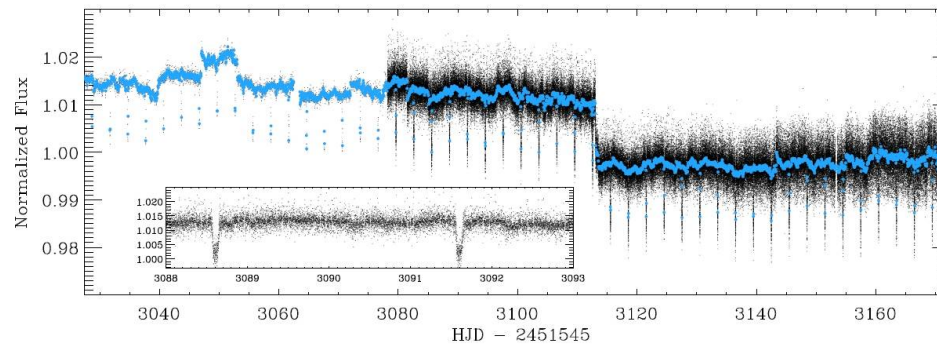
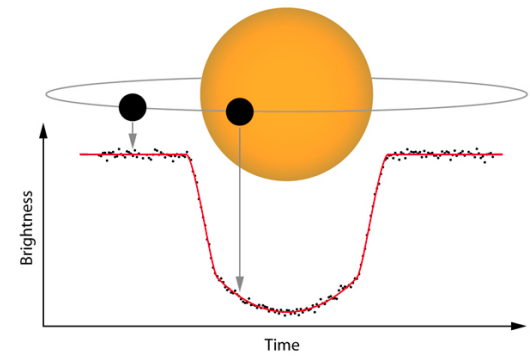


PLATO



Photométrie spatiale haute précision

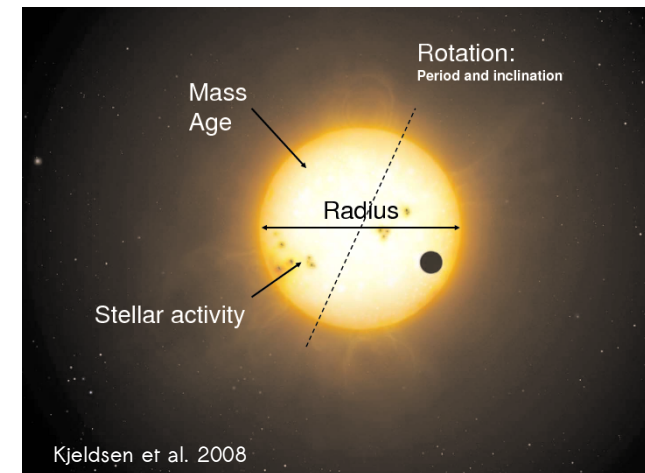
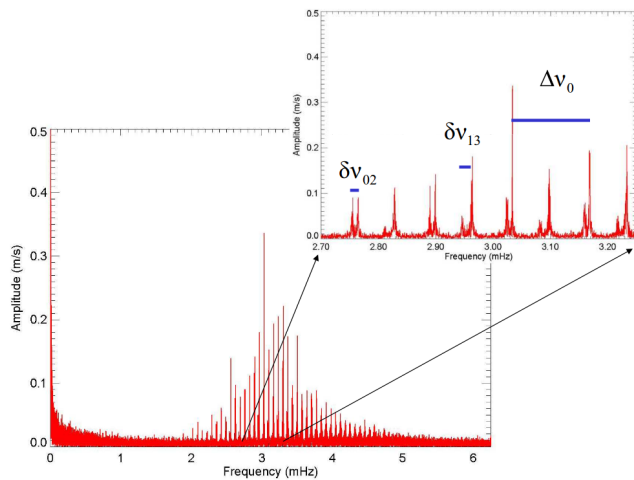
Photométrie spatiale de haute précision + suivi sol en vitesse radiale → détection d'exoplanètes



Gandolfi et al., 2010

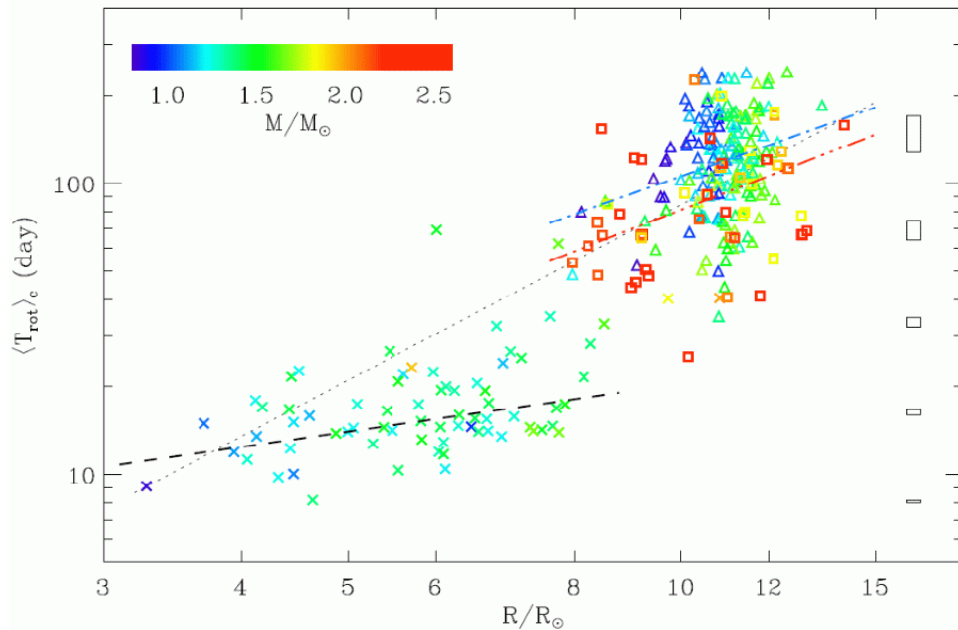
Fourier Analyse de Fourier des courbes de lumière

- spectre de puissance
- astérosismologie
- sonde de la structure interne et mesure des propriétés basiques des étoiles

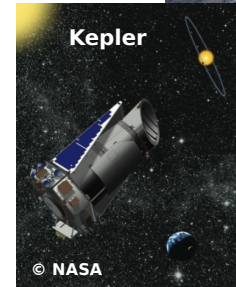
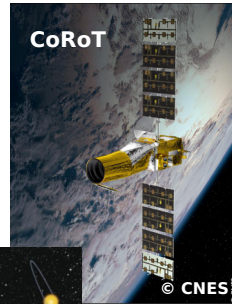


Quelques résultats de CoRoT et Kepler

Nouvelle ère pour la physique stellaire

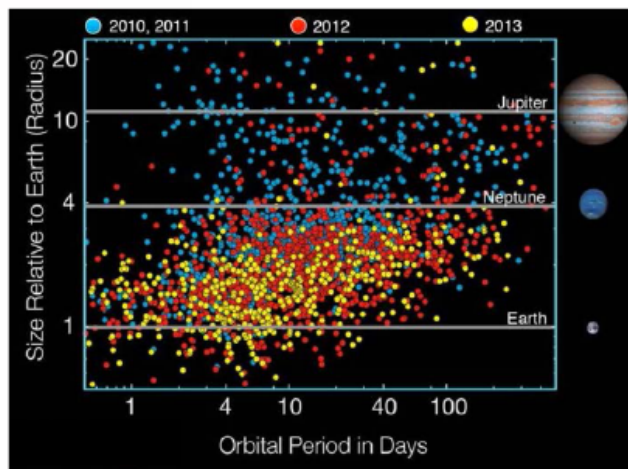


Rotation interne des géantes rouges



Grande diversité de systèmes planétaires

Kepler planet candidate statistics



Exoplanètes CoRoT confirmées



But de la mission PLATO 2.0

But principal

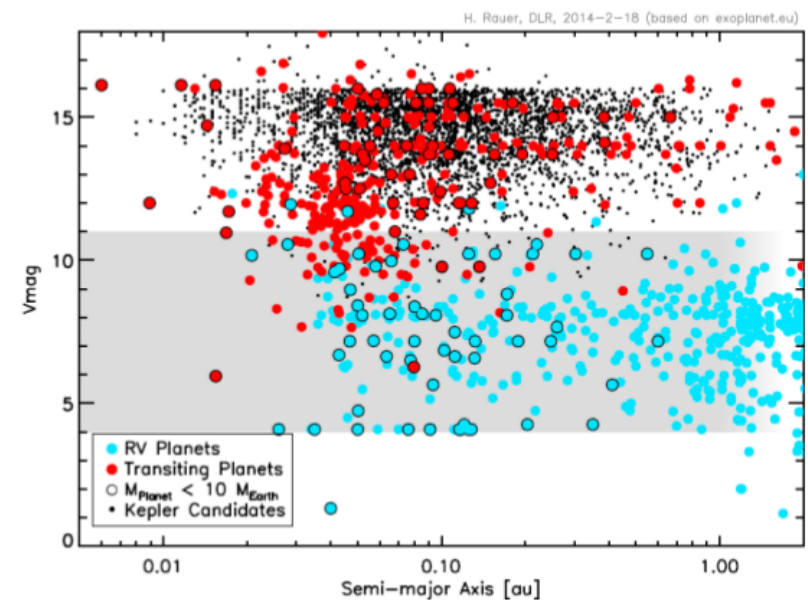
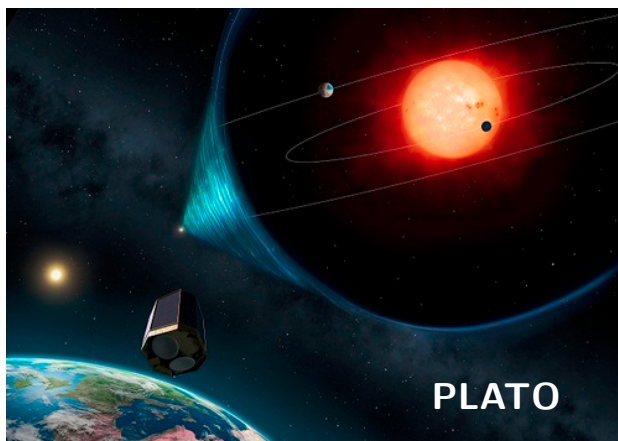
Détecter des exoterres dans la zone habitable d'étoiles comme le soleil et en caractériser les propriétés

PLATO combinera pour cela:

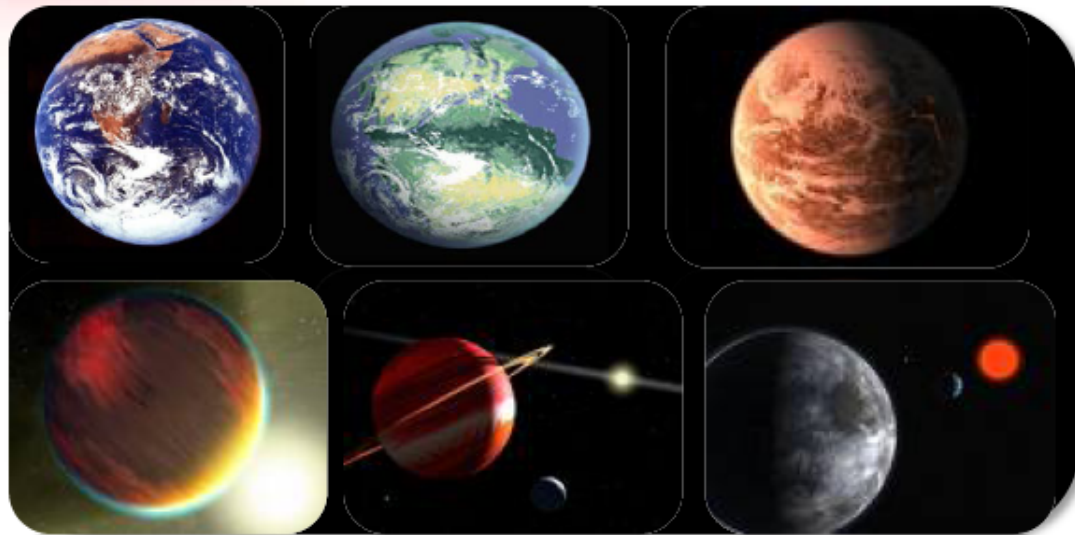
La détection de planètes et la détermination de leurs rayons par la méthode des transits

La détermination de la masse des planètes par suivi de la vitesse radiale

La détermination précise des masses, rayons et âges des étoiles hôtes par l'astérosismologie



PLATO 2.0: Exoplanets and Stars



Characterization of exoplanets ... needs characterization of stars

- **Mass + radius** → mean density
(gaseous vs. rocky, composition, structure)
- **Orbital distance, atmosphere**
(habitability)
- **Age**
(planet and planetary system evolution)

- **Stellar mass, radius**
(derive planet mass, radius)
- **Stellar type, luminosity, activity**
(planet insolation)
- **Stellar age**
(defines planet age)