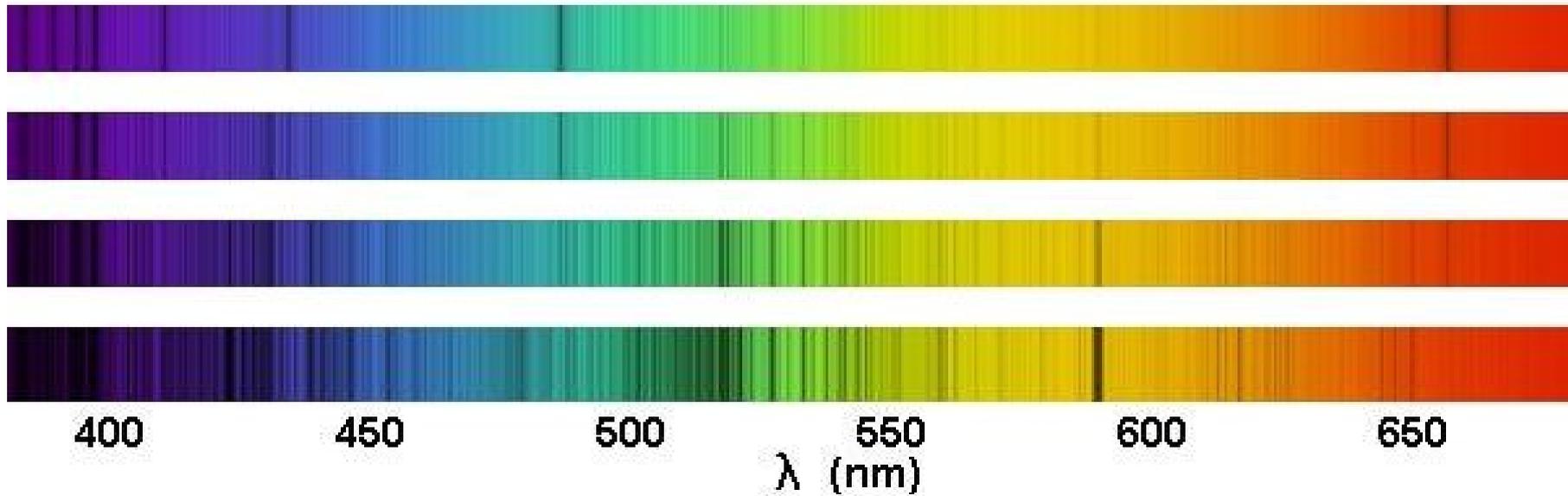


Les Étoiles



On utilise quatre types d'informations pour décrire une étoile :

- sa luminosité ou sa brillance
- sa couleur, sa température ou son “type spectral”
- son degré d'évolution ou classe de luminosité
- sa “métallicité” ou composition chimique

Trois types de spectres (lois de Kirchhoff, 1859)

1- un gaz à pression élevée, un liquide ou un solide, s'ils sont chauffés, émettent un **rayonnement continu** qui contient toutes les couleurs

le soleil, les étoiles



2- un gaz chaud, à basse pression, émet un rayonnement uniquement pour certaines couleurs bien spécifiques:

le spectre présente des **raies d'émission**

comètes, nébuleuses

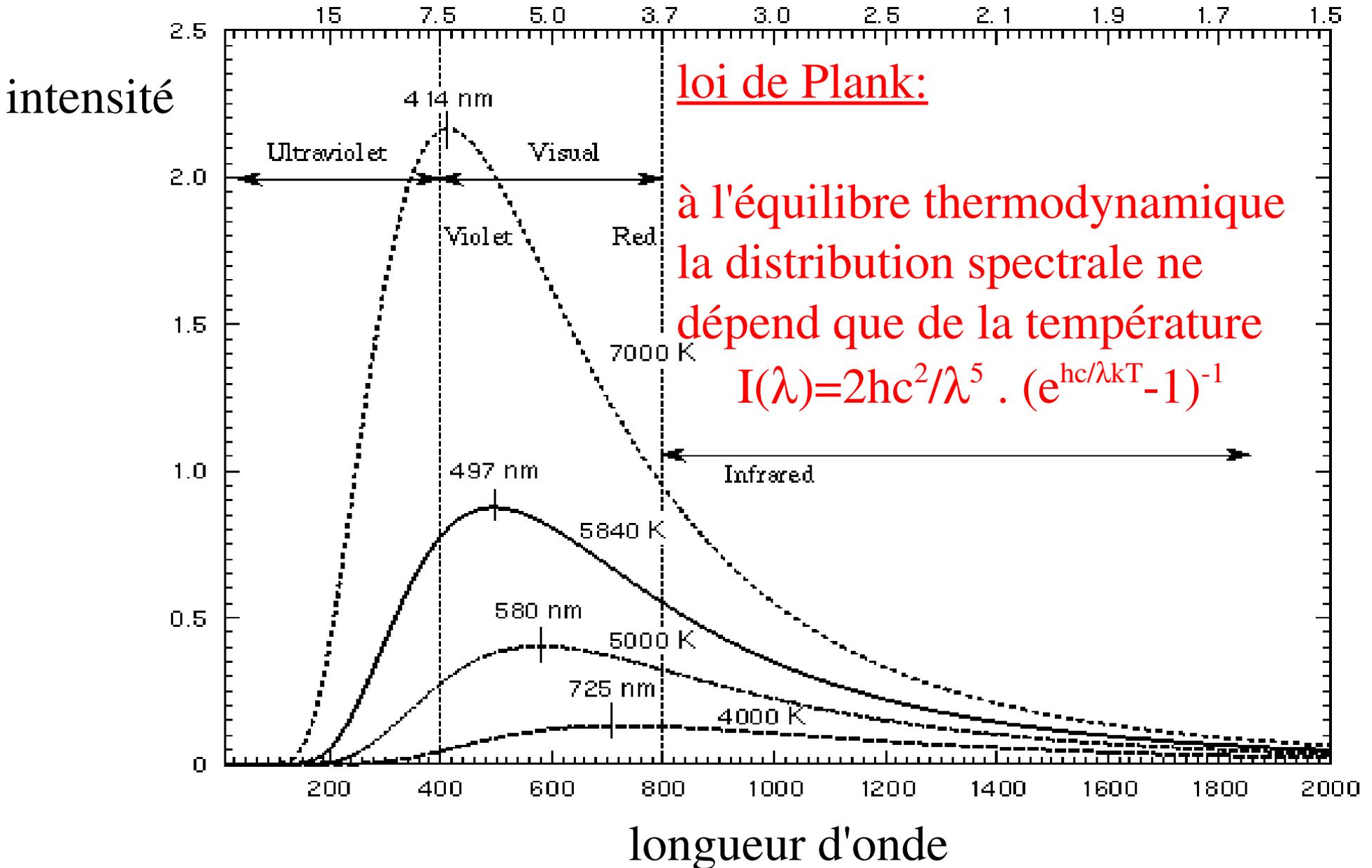


3- un gaz froid, à basse pression, s'il est situé entre l'observateur et une source de rayonnement continu, absorbe certaines couleurs, produisant dans le spectre des **raies d'absorption**

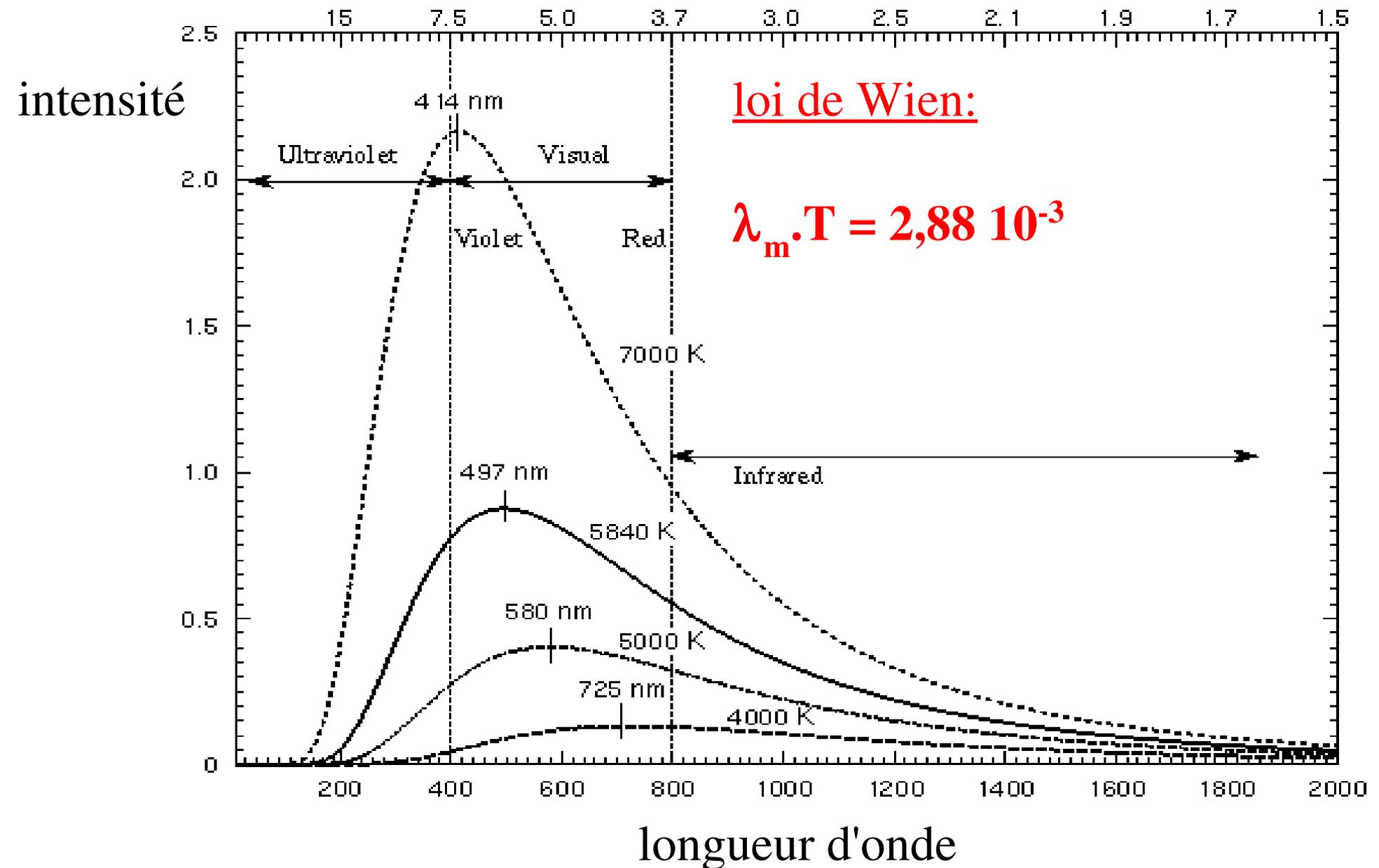
atmosphères stellaires



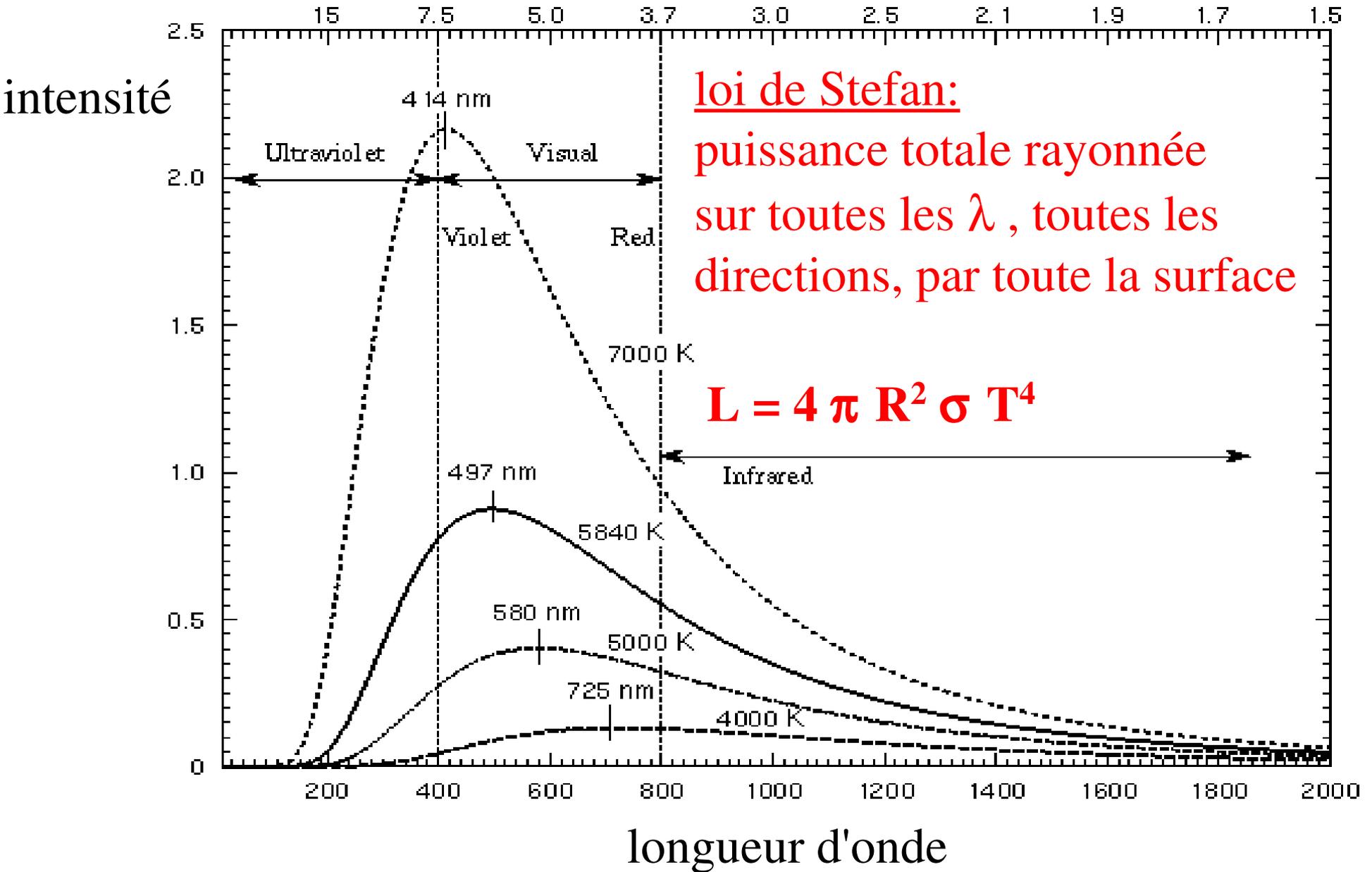
Spectre continu du corps noir (loi de Planck)



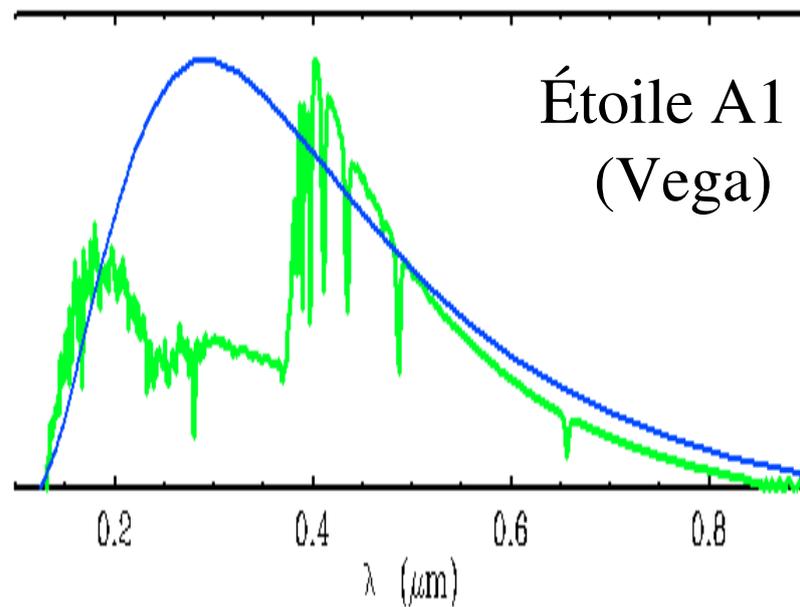
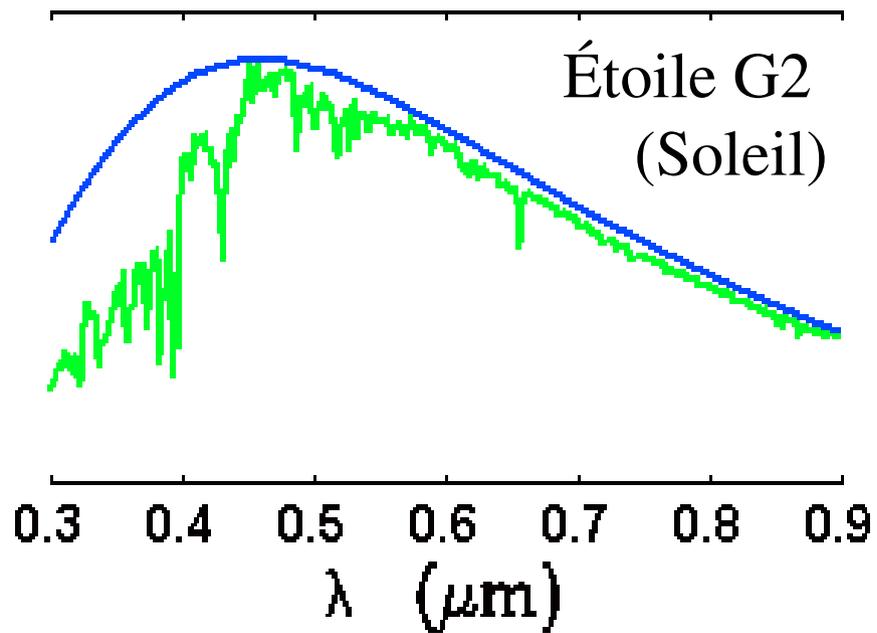
Spectre continu du corps noir (loi de Planck)



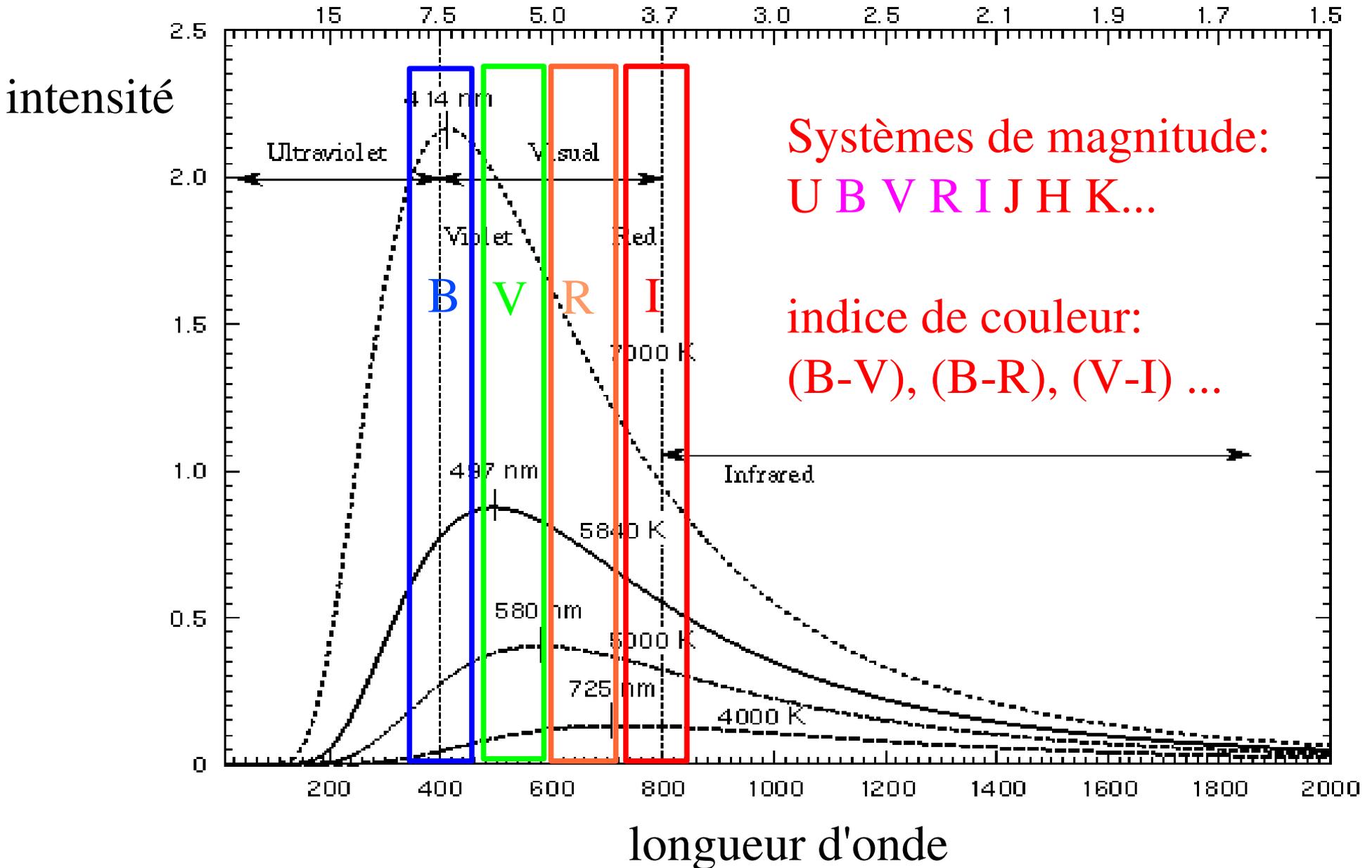
Spectre continu du corps noir (loi de Planck)



Spectre continu du corps noir (loi de Planck)



Relation température – indice de couleur



Les magnitudes

Eclat apparent et luminosité :

L est la puissance rayonnée (Watts)

$E = L/4\pi d^2$ est le flux reçu par le télescope (Watts/m²)

la magnitude apparente m :

$$m_1 - m_2 = -2,5 \log(E_1/E_2) \quad \longrightarrow \quad m = -2,5 \log E + \text{cst}$$

où E_i est l'éclat apparent de l'étoile i mesurée à travers un filtre donné

$$m_{\text{Soleil}} = -26.8, \quad m_{\text{Lune}} = -12.7, \quad m_{\text{Venus}} = -4.1, \quad m_{\text{Sirius}} = -1.4$$

l'indice de couleur IC : dans le système “U B V R I J H K”

B-V, U-B, V-I etc...

la correction de l'extinction : $m_{\text{vraie}} = m_{\text{obs}} - \text{ext}$

la magnitude absolue M :

“la magnitude apparente qu'aurait l'étoile si elle était située à 10 pc”

le parsec : 1 pc = 206265 u.a. = 3,262 a.l. = $3.086 \cdot 10^{16}$ m

Les magnitudes

Applications :

L'oeil ne permet de voir que les étoiles de magnitude inférieure ou égale à 6; l'usage de puissants télescopes permet de photographier les étoiles jusqu'à la magnitude 25.

1 – Expliquer d'où vient la différence.

2 – Quel est le rapport des éclats apparents limites E_1 et E_2 ? A quel rapport de distance correspond-il pour des étoiles de même luminosité?

Montrer que : $m - M = 5 \log d - 5$, où d est exprimée en parsecs

On considère deux étoiles :

pour l'une $B=7,2$ et $V=7,5$; pour l'autre $B=8,7$ et $V=7,5$

Quelle est l'étoile la plus bleue ?

Contraction d'un nuage de gaz

I- Masse et rayon de Jeans

Théorème du viriel : $2.E_c + \Omega = 0$

énergie cinétique d'un gaz :

$$E_c = \frac{3}{2} N k_B T \text{ avec } N = \frac{M}{m_H}$$

énergie potentiel d'un nuage de gaz de masse :

$$\Omega = -\frac{3GM^2}{5R}$$

Contraction d'un nuage de gaz

II- Température et réaction thermonucléaires

limite pour la formation d'une planète :

$$T < 10^5 \text{ K} \rightarrow M_{\text{lim}} = 6.10^{27} \text{ kg} = 0.003M_{\text{soleil}}$$

températures de fusion :

hydrogène $T > 20 \cdot 10^6 \text{ K} \rightarrow M > 0.1 M_{\text{soleil}}$

hélium $T > 10^8 \text{ K} \rightarrow M > 4 M_{\text{soleil}}$

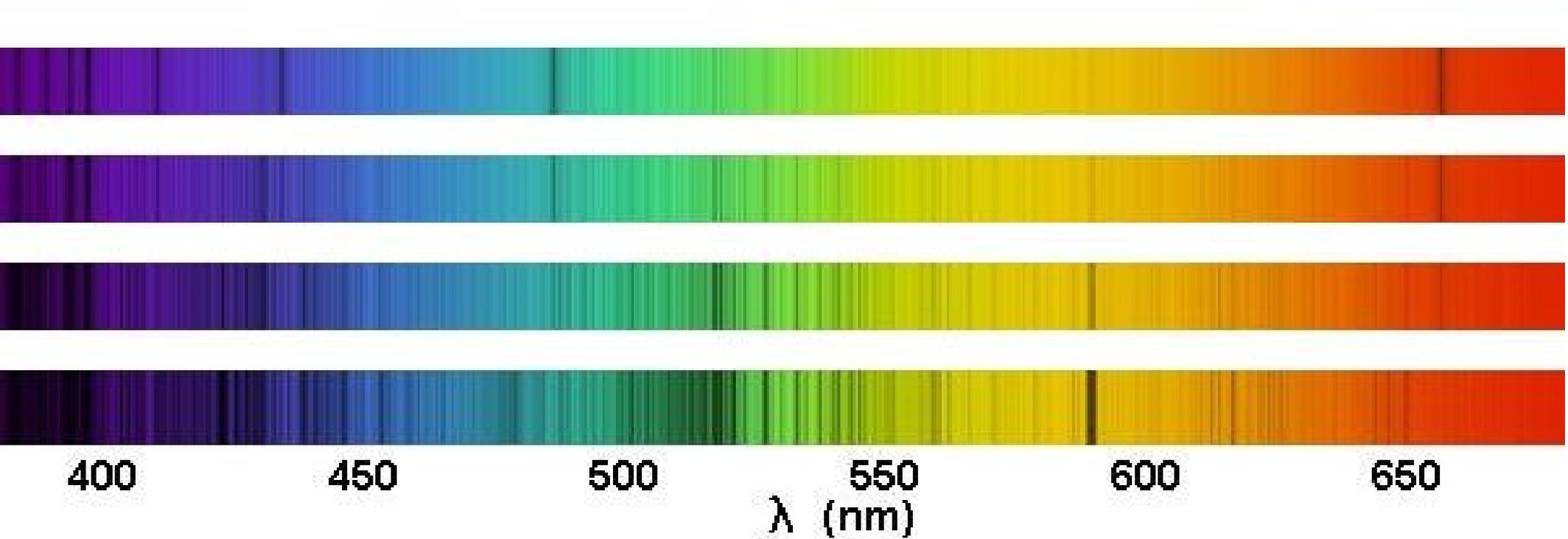
carbone $T > 0.6 \cdot 10^9 \text{ K}$

oxygène $T > 10^9 \text{ K}$

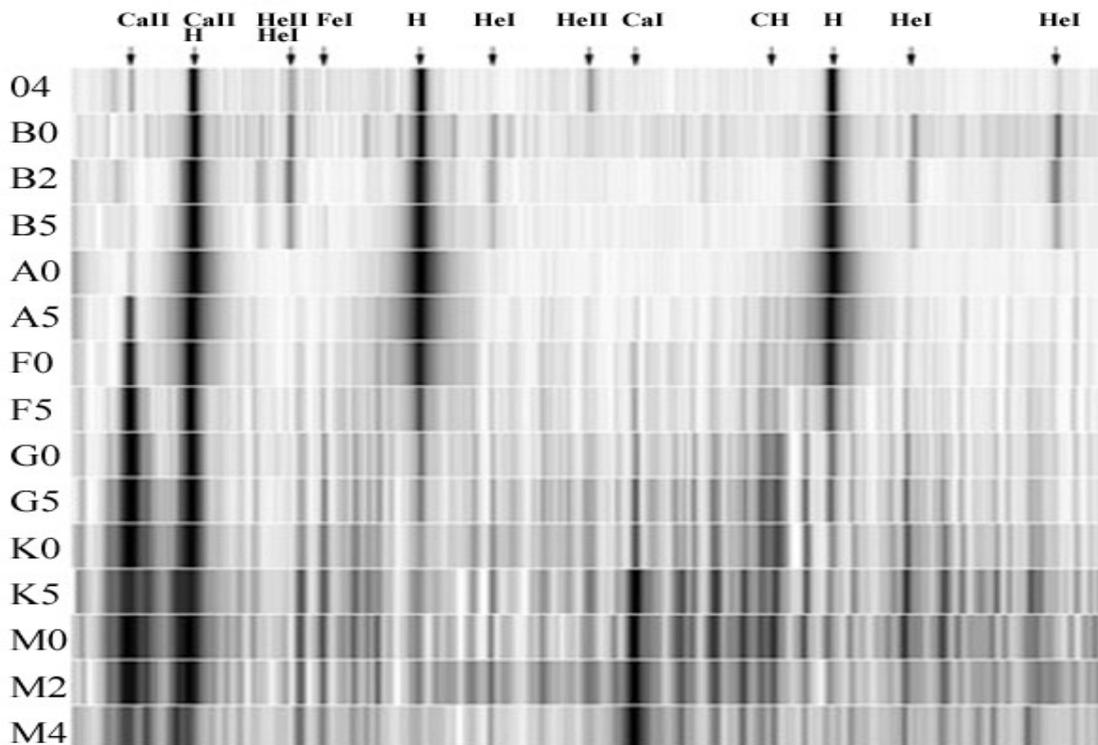
silicium $T > 3 \cdot 10^9 \text{ K}$

→ structure en pelure d'oignon

Le diagramme de Hertzsprung-Russell et la classification spectrale des étoiles



La classification spectrale



Main Sequence A5 – G0

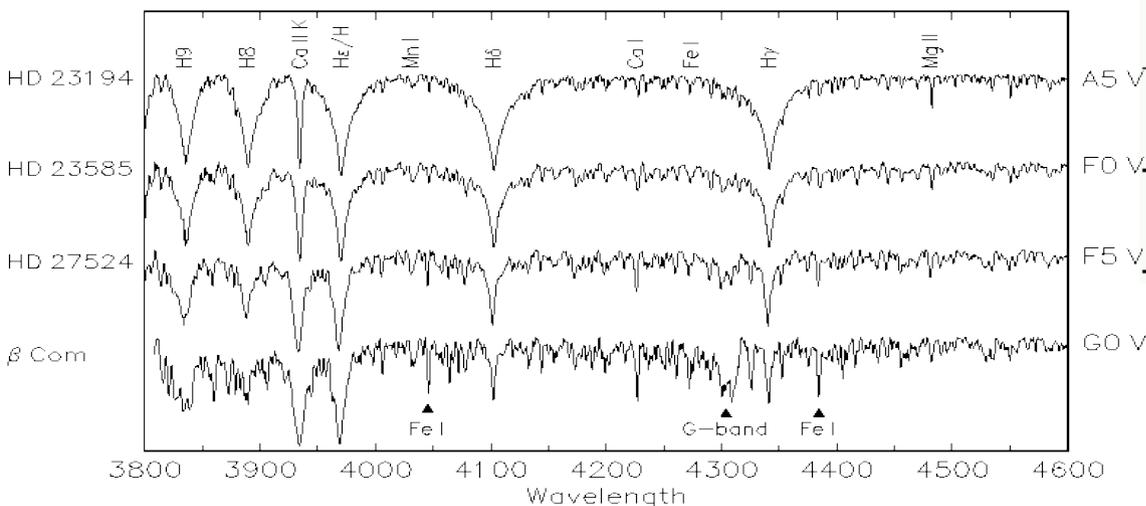
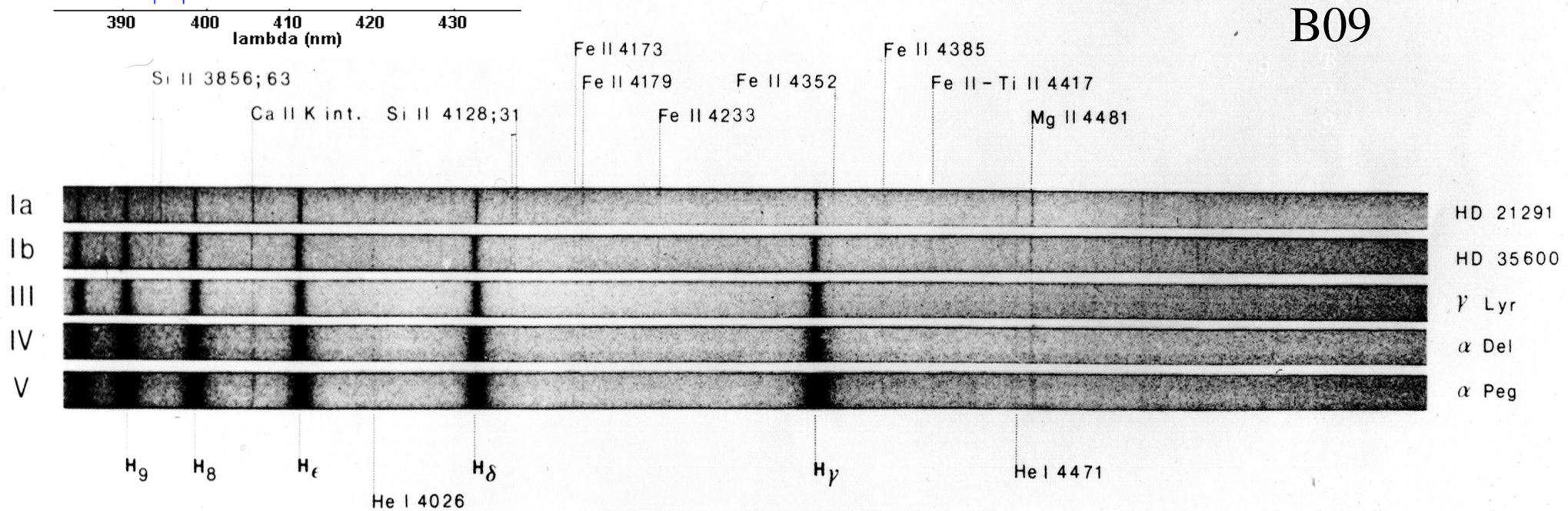
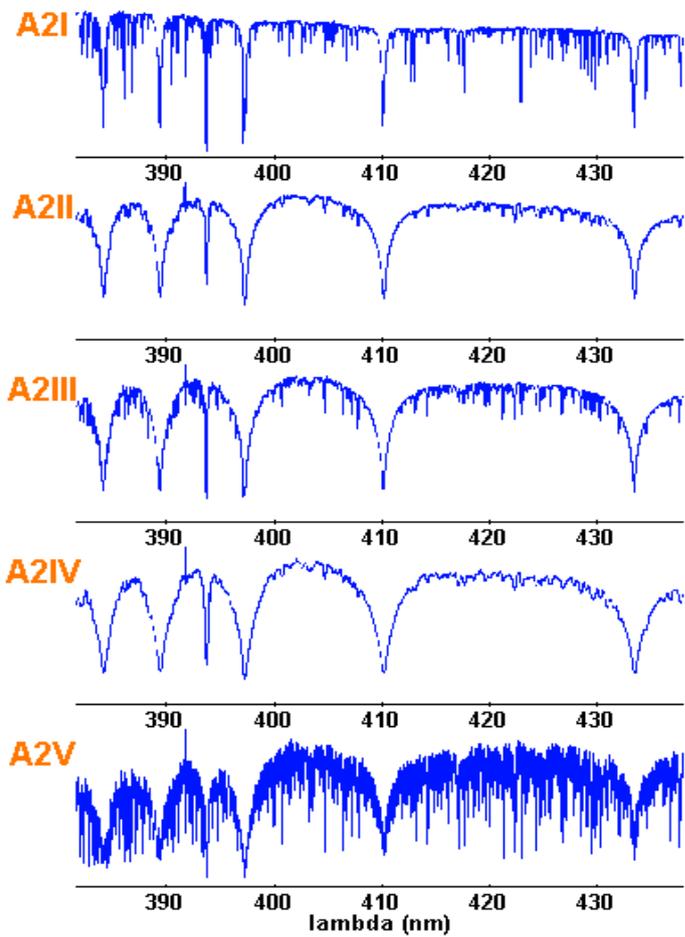


Table : Classes spectrales

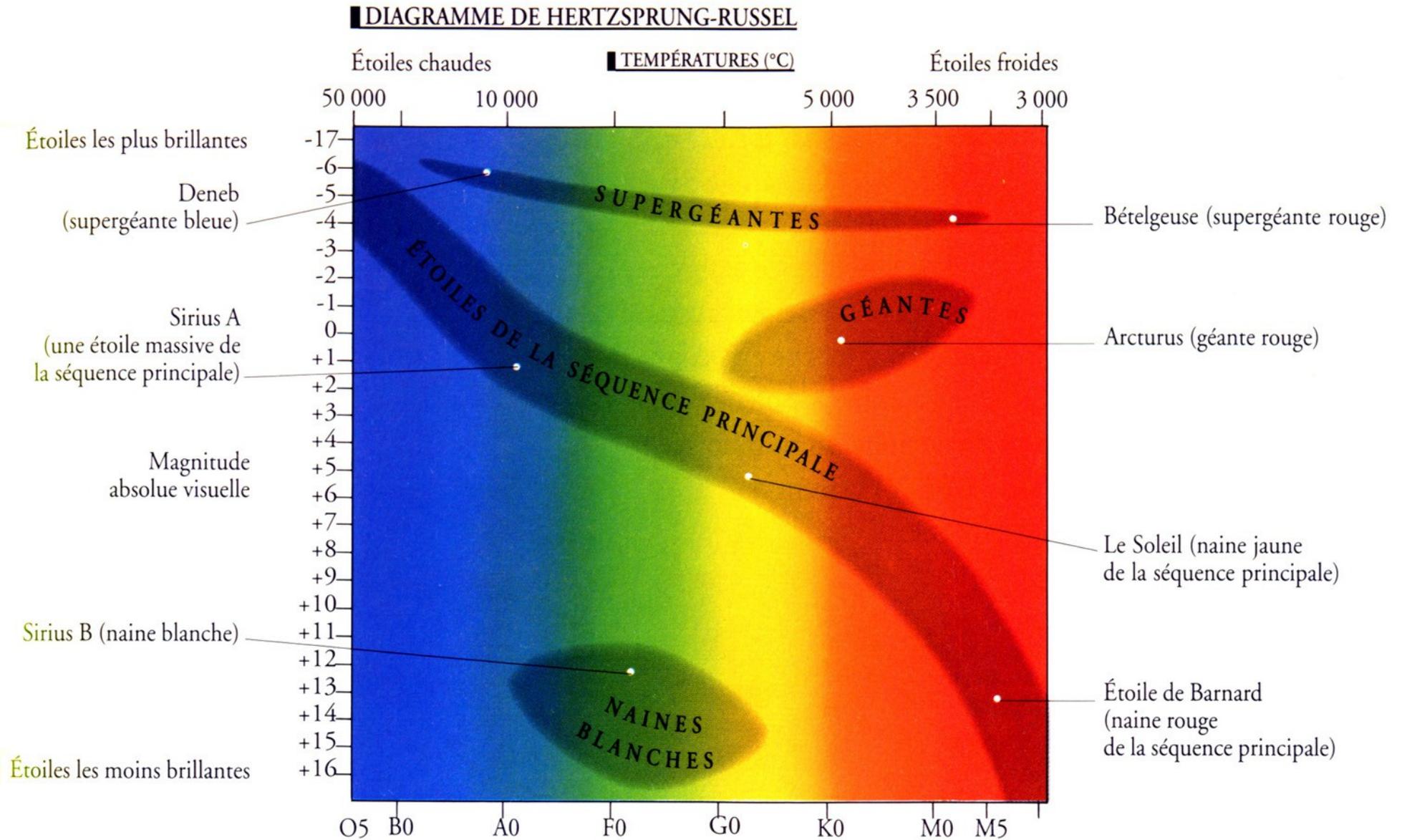
Classe	Exemple	T (K)	Caractéristiques
O	10 Lacertae	> 25000	Peu de raies d'absorption sont visibles dans le spectre ; quelques raies de l'hélium ionisé une fois, azote ionisé deux fois, silicium ionisé trois fois.
B	Rigel	11 000 - 25 000	Raies de l'hélium neutre intenses (maximum d'intensité pour le type B2) ; raies du silicium ionisé une ou deux fois ; raies de l'oxygène et du magnésium ionisé une fois ; les raies de l'hydrogène commencent à apparaître ; les raies de l'hélium ionisé ont disparu.
A	Véga	7 500 - 11 000	Raies de l'hydrogène très intenses : elles dominent le spectre (maximum d'intensité pour le type A0) ; raies d'éléments ionisés une fois : magnésium, silicium, fer, titane, calcium, etc. ; les raies des métaux neutres sont très faibles.
F	Procyon	6 000 - 7 500	L'intensité des raies de l'hydrogène diminue ; les raies du calcium, du fer et du chrome ionisé une fois sont encore présentes ; l'intensité des raies des métaux neutres augmente.
G	Soleil	5 000 - 6 000	Les raies du calcium ionisé sont très intenses ; nombreuses raies de métaux neutres ou ionisés ; apparition des bandes moléculaires de CH.
K	Arcturus	3 500 - 5 000	Les raies des métaux neutres dominent le spectre ; la bande moléculaire CH est toujours intense.
M	Bételgeuse	< 3500	Raies intenses des métaux neutres ; bandes moléculaires de l'oxyde de titane TiO très développées.

Les classes de luminosités:

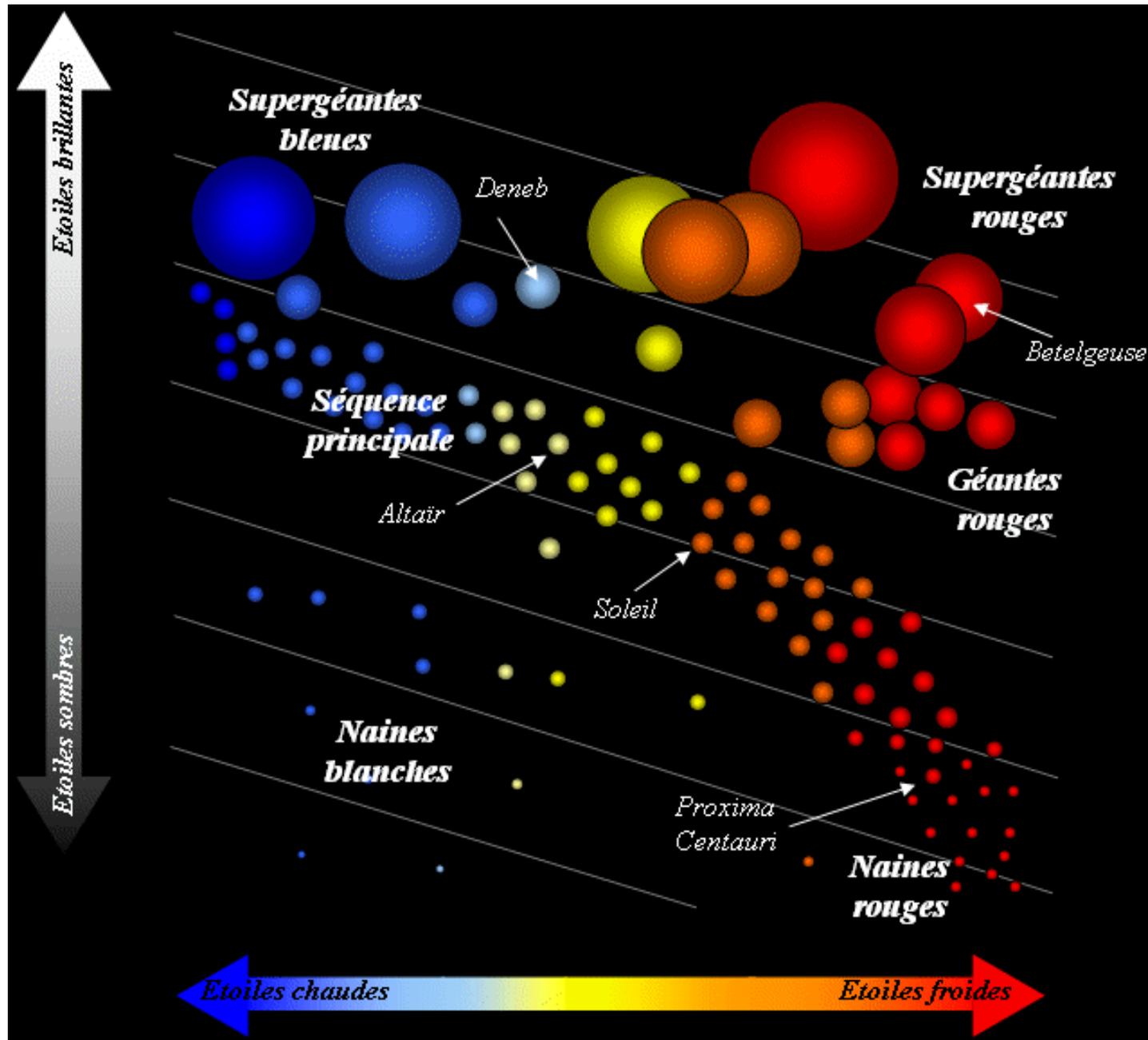
- Ia, Ib : supergéantes
- II : géantes brillantes
- III : géantes
- IV : sous géantes
- V : naines
- VI : sous naines



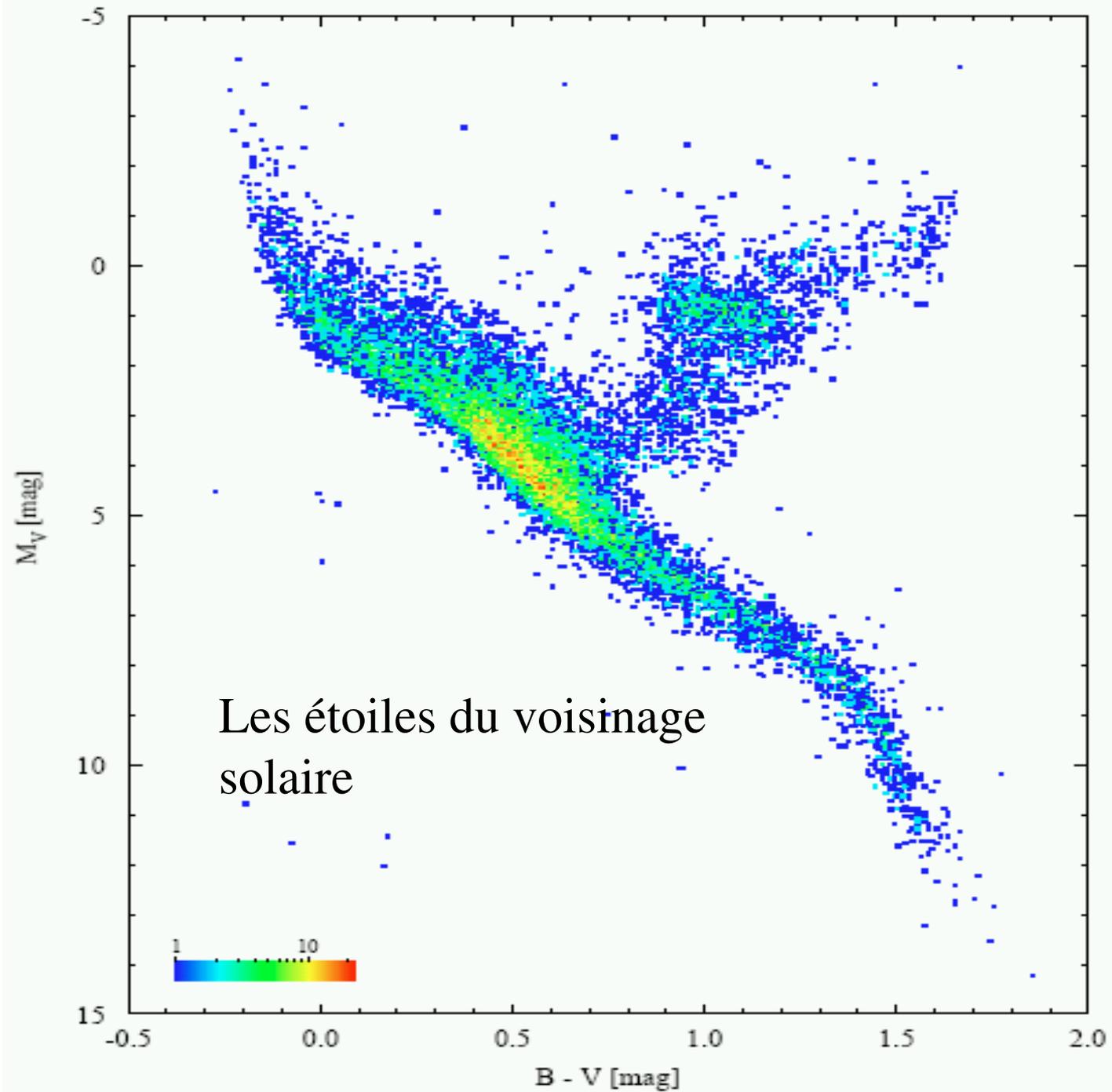
le diagramme de Hertzsprung-Russell



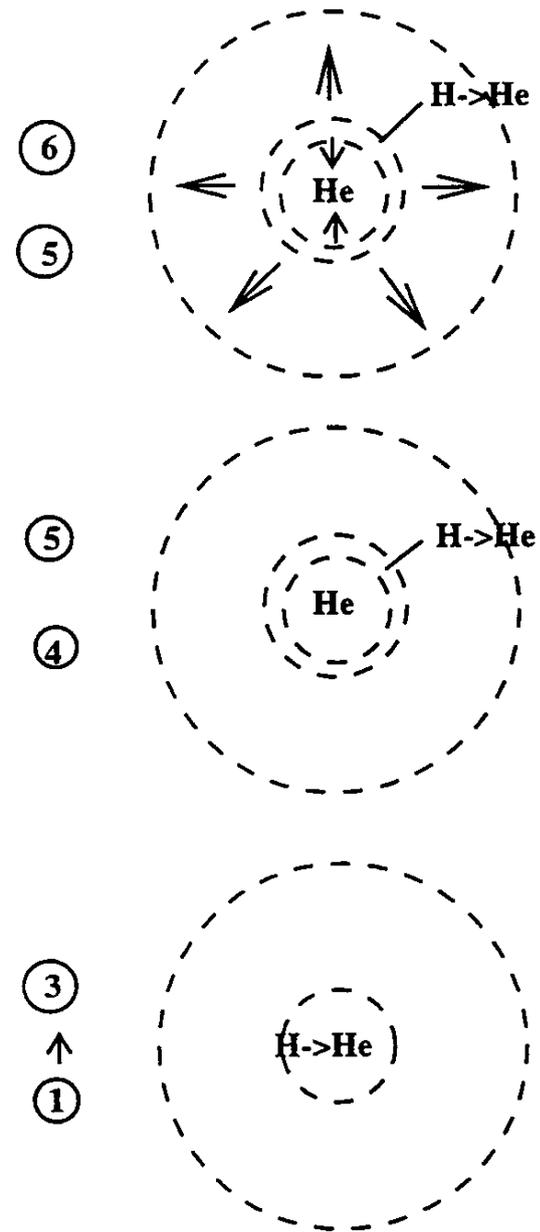
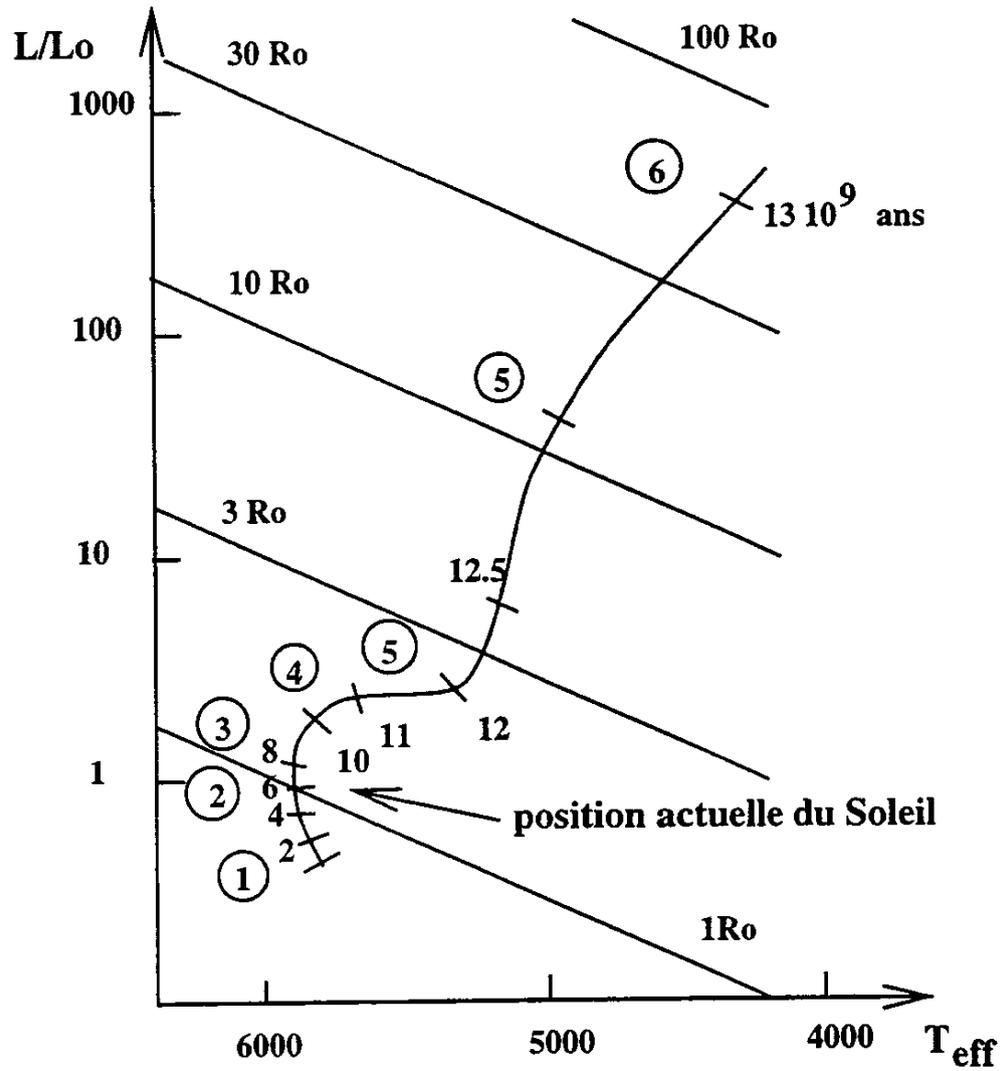
le diagramme de Hertzsprung-Russell



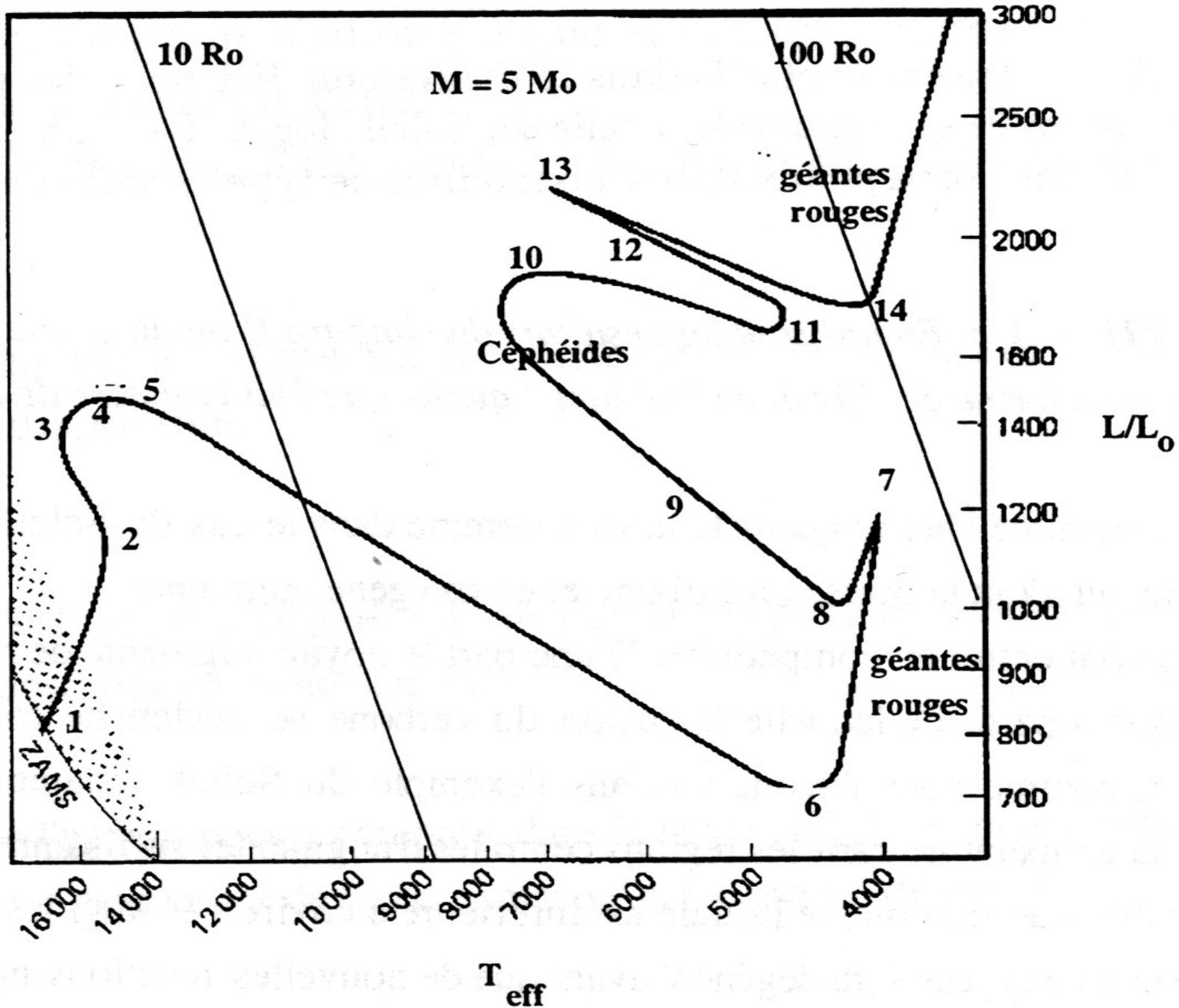
le diagramme de Hertzsprung-Russell



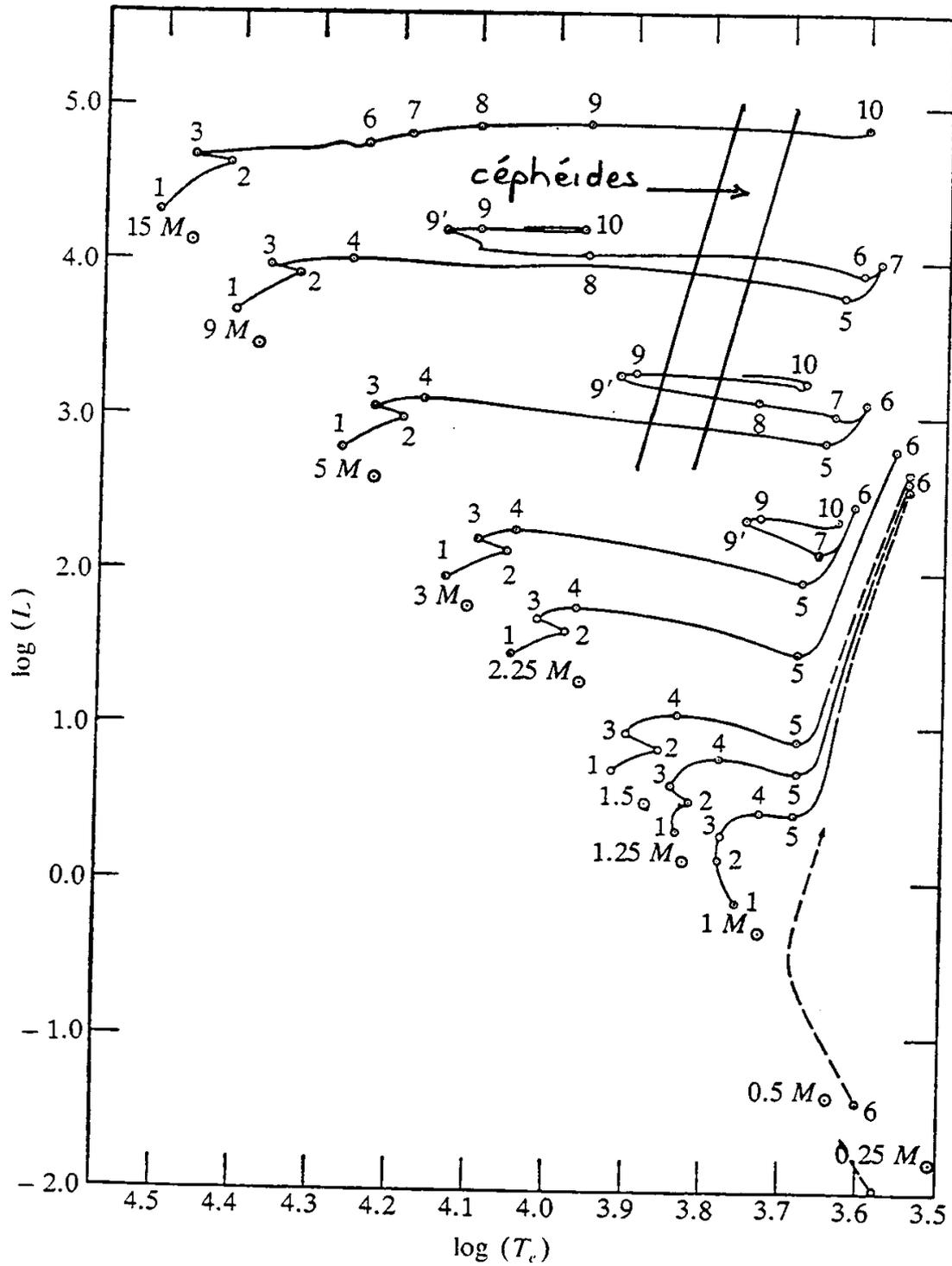
trajet évolutif d'une étoile de une masse solaire

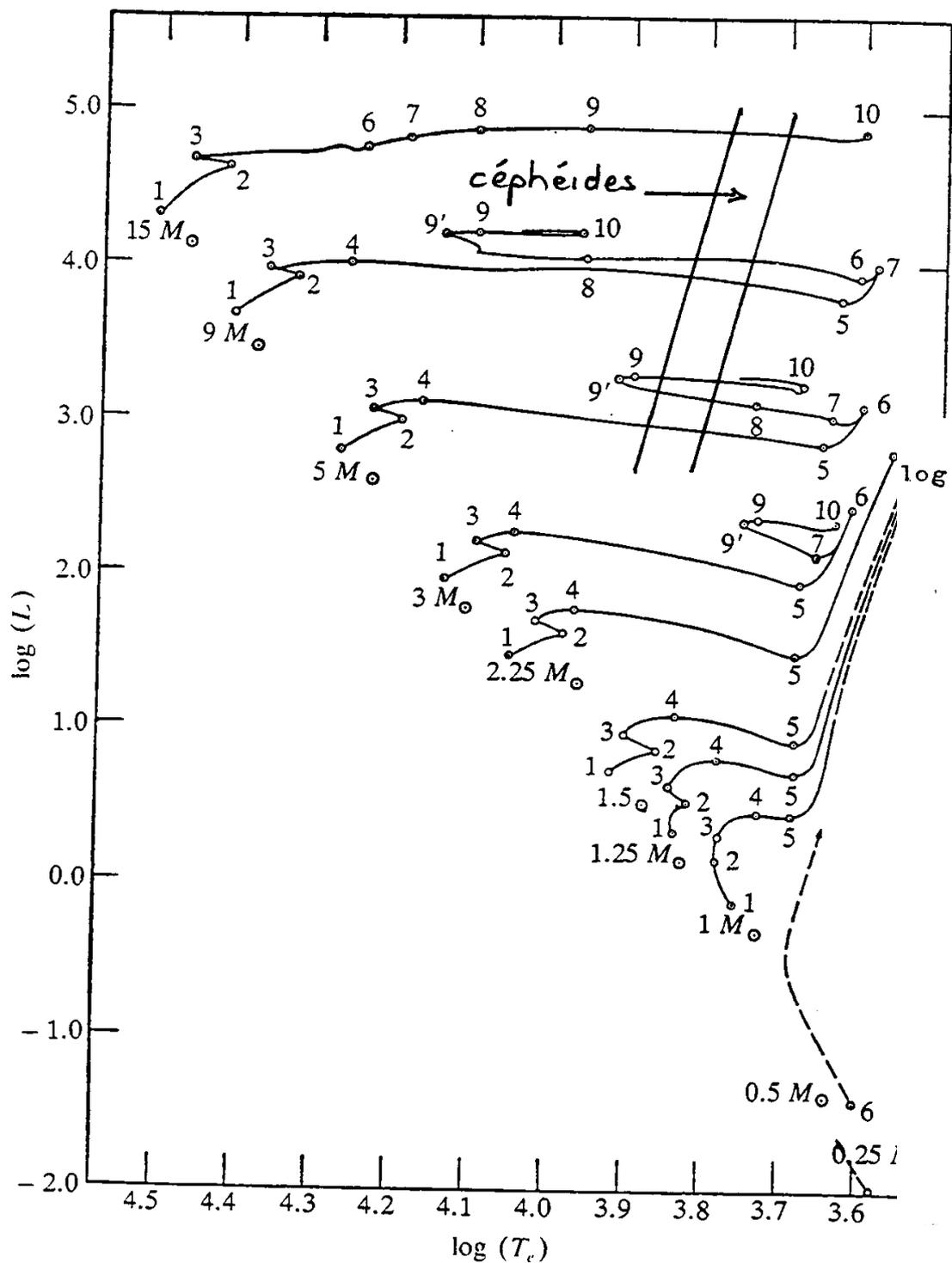


trajet évolutif d'une étoile de 5 masses solaires



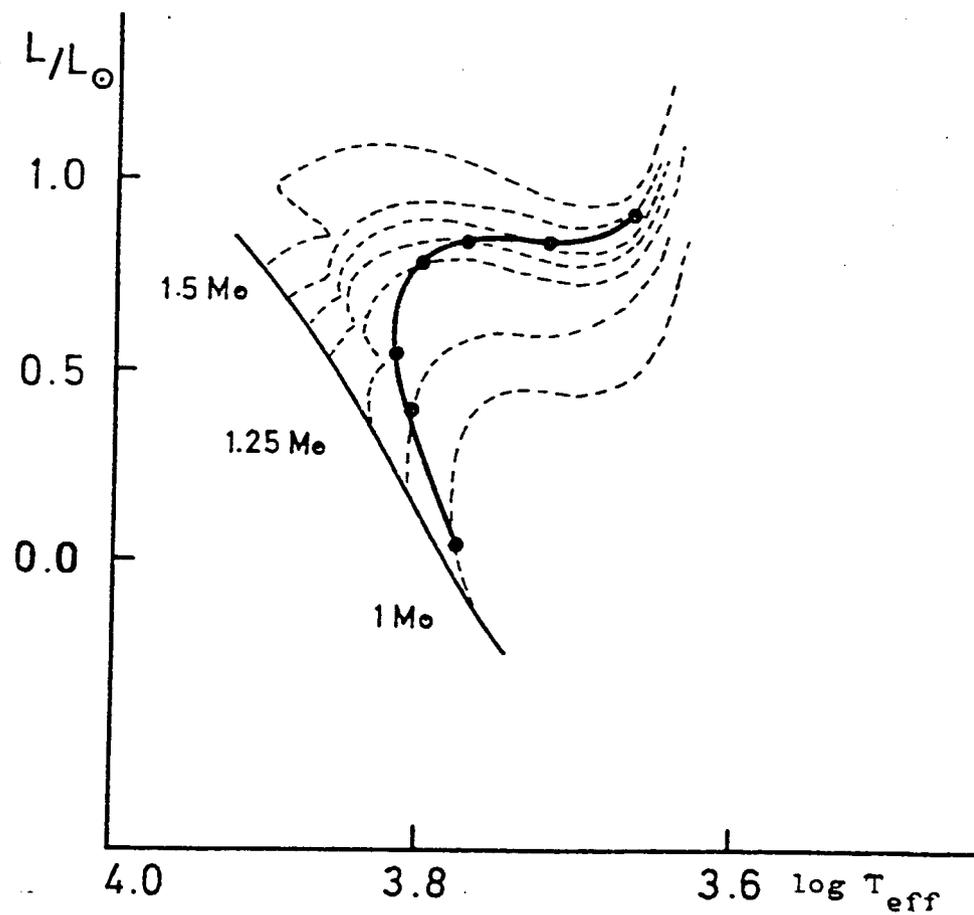
trajets évolutifs

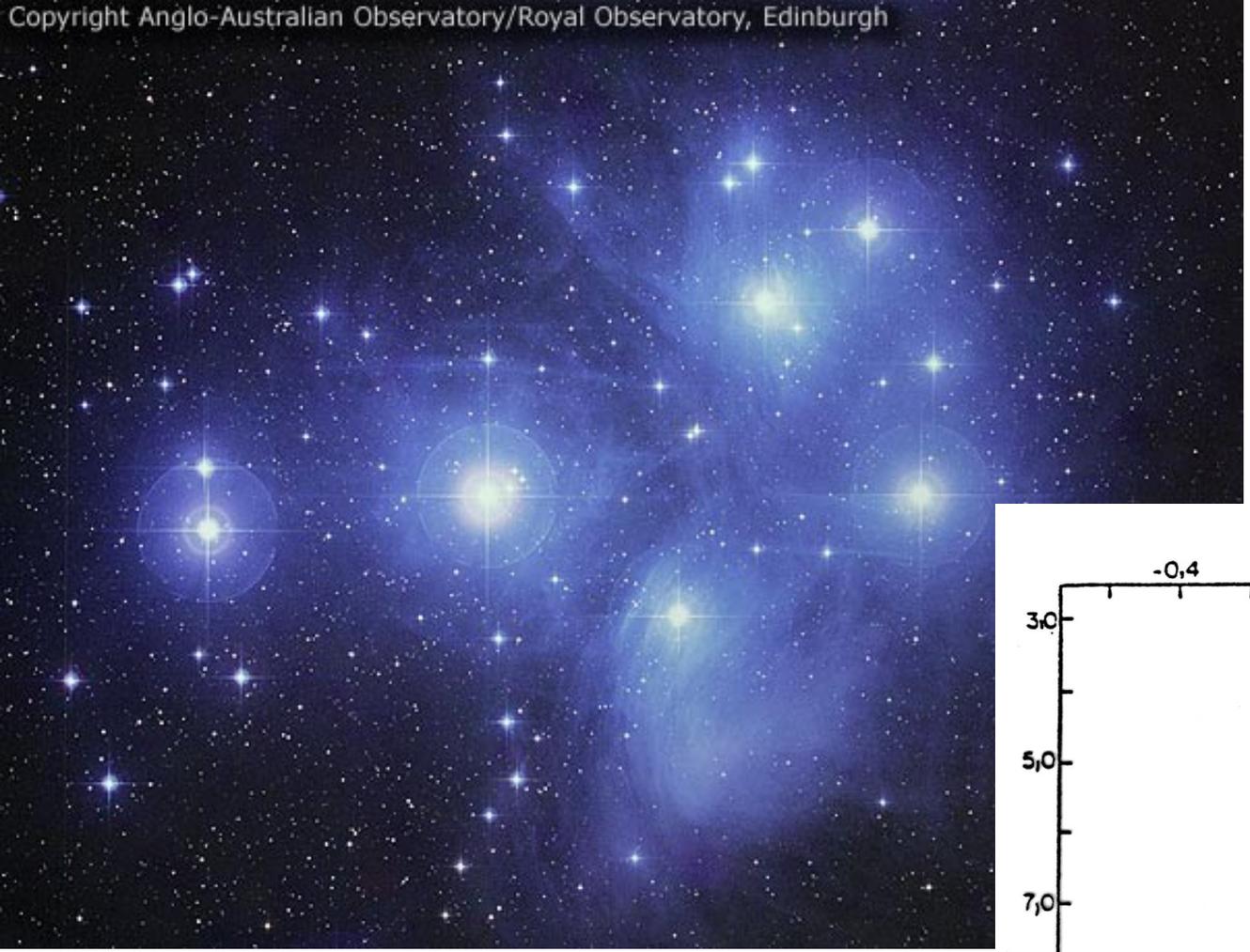




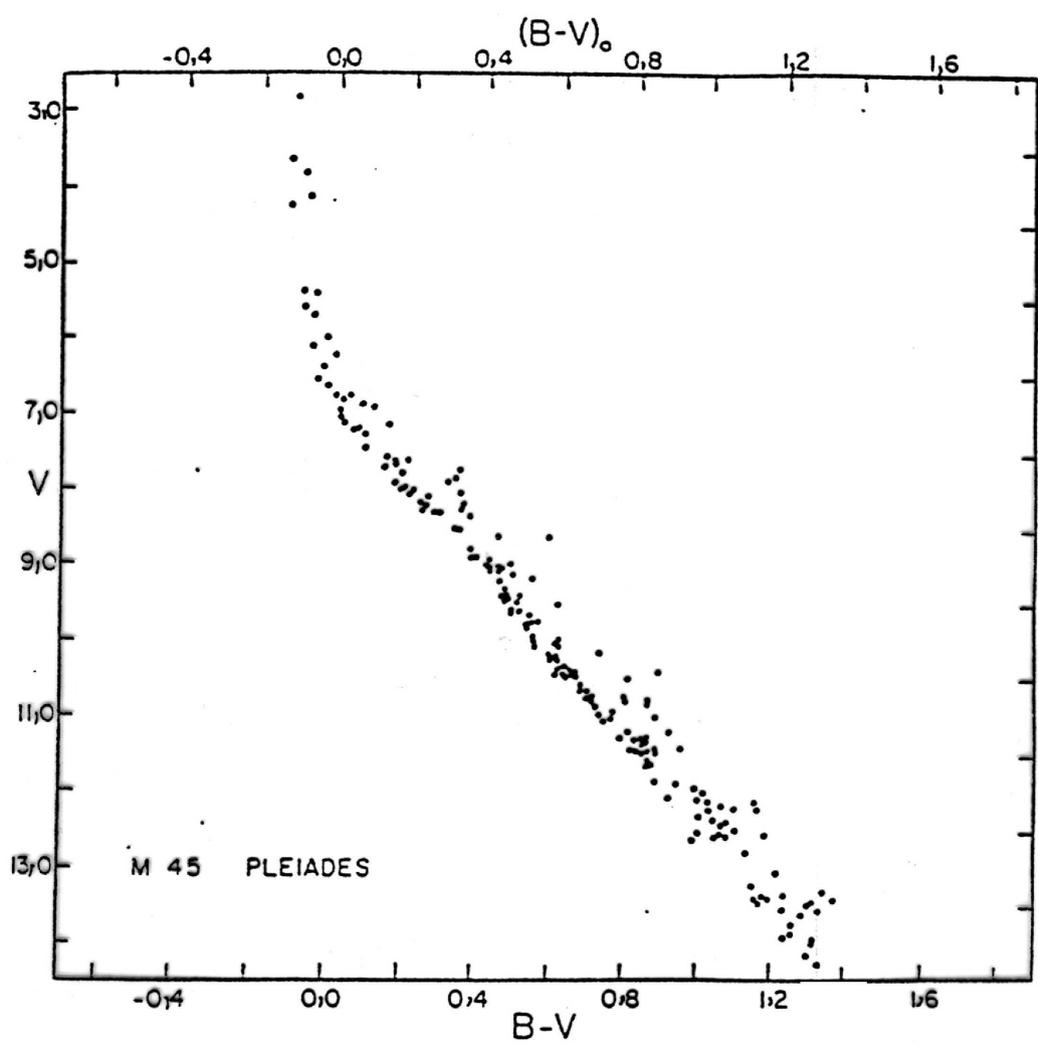
trajets évolutifs

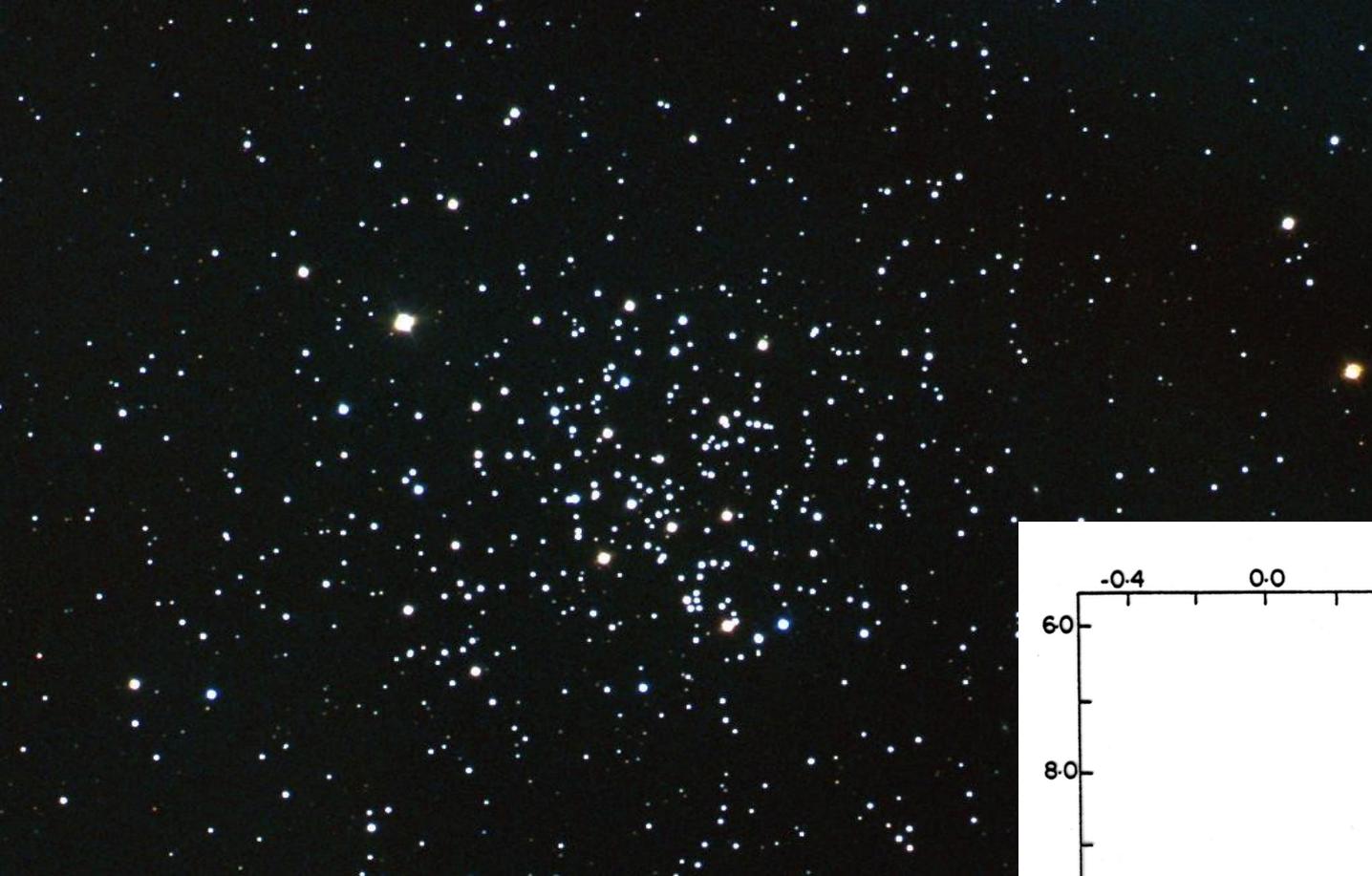
tracé des isochrones



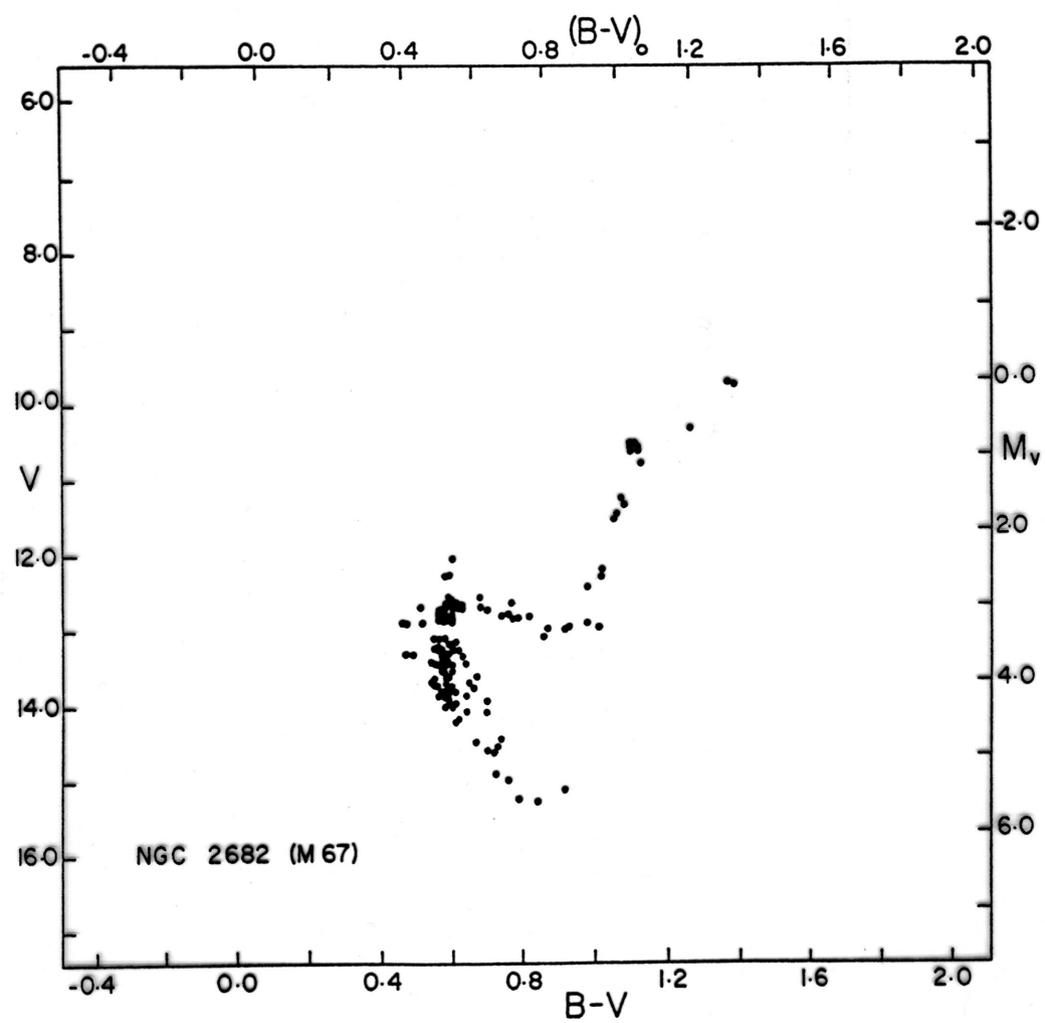


Amas jeune





Amas vieux

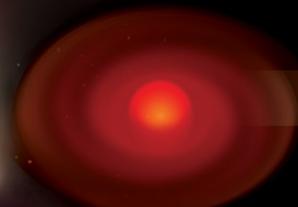


MASS ↑

TIME →

Stellar
Nursery

Stellar
Nursery

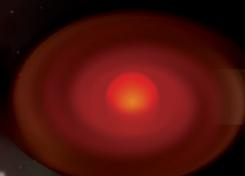


Protostar

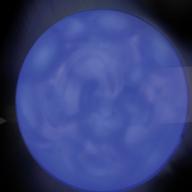


Blue Supergiant

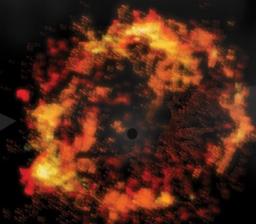
Black
Hole



Protostar

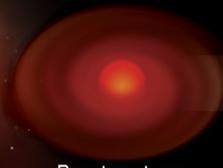


Blue Supergiant



Supernova

Black
Hole



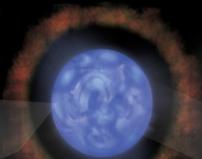
Protostar



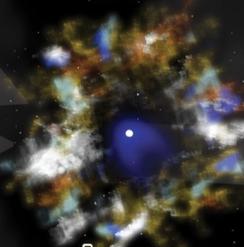
Blue Supergiant



Red Giant
(with stellar winds)

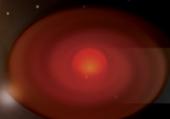


Blue Supergiant



Supernova
(with neutron star)

Neutron
Star



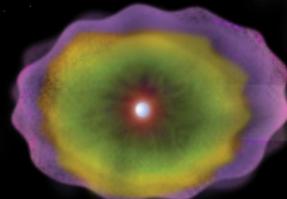
Protostar



Solar
Type Star



Red Giant



Planetary Nebula

White
Dwarf



Protostar



Red Dwarf



Red Dwarf

White
Dwarf



Protostar

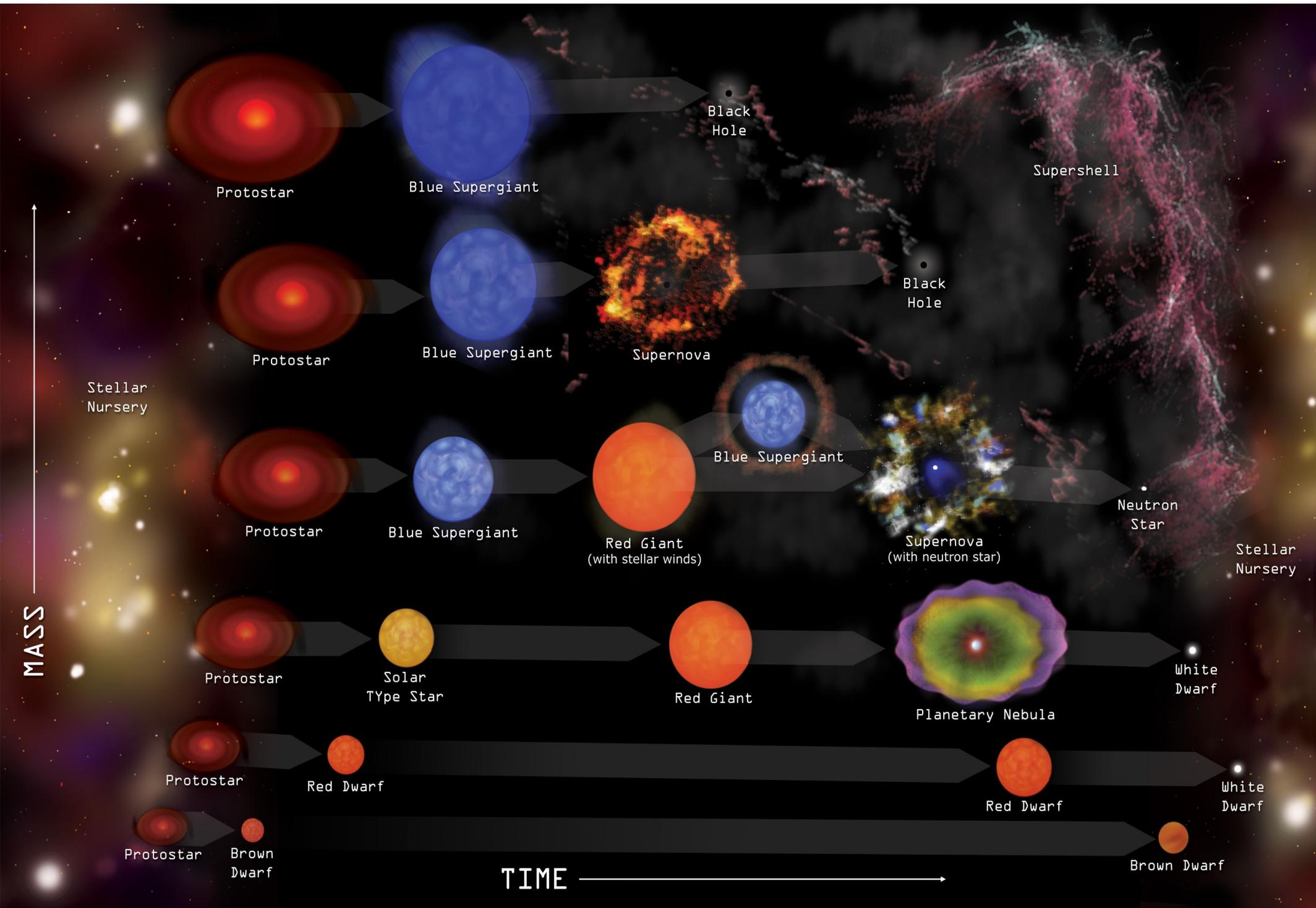


Brown
Dwarf



Brown Dwarf

Supershell



Applications

Étude d'un système binaire :

HD58713A : type spectral A0V ; magnitude $V=8.69$

HD58713B : type spectral K0IV ; magnitude $V=11.04$

Morts d'étoiles (théorie)

Naine blanche : pression de dégénérescence des électrons
 $M < 1.4 M_{\text{soleil}}$
pour le Soleil, $R \sim 7000 \text{ km} \sim 1\% R_{\text{actuel}}$

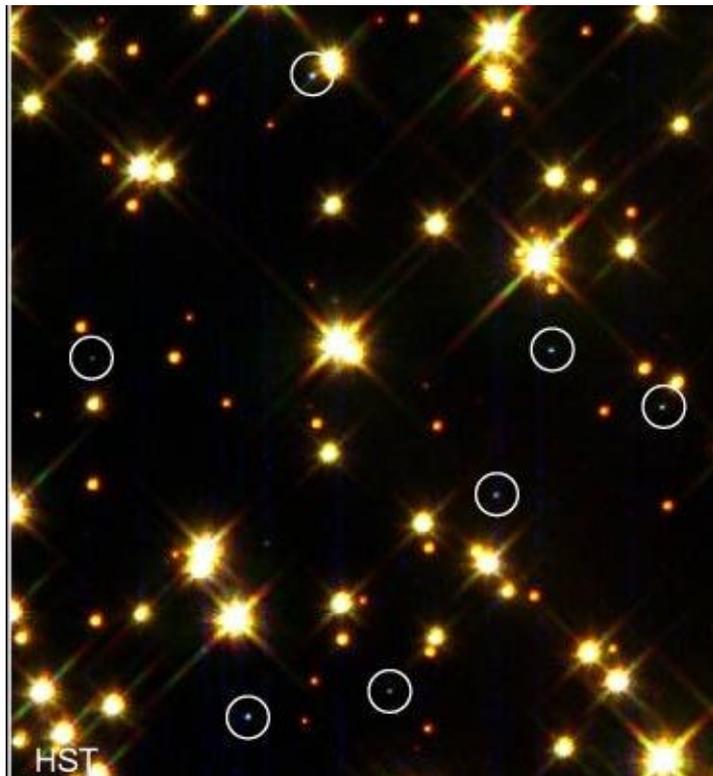
Étoile à neutrons : pression de dégénérescence des neutrons
 $R(\text{km}) \sim 15 (M/M_{\text{soleil}})^{-1/3}$
 $M = 1.4-2.0 M_{\text{soleil}} ; R = 11-15 \text{ km}$

Trou noir : un trou noir est un objet dont la vitesse de libération
vaut la vitesse de la lumière

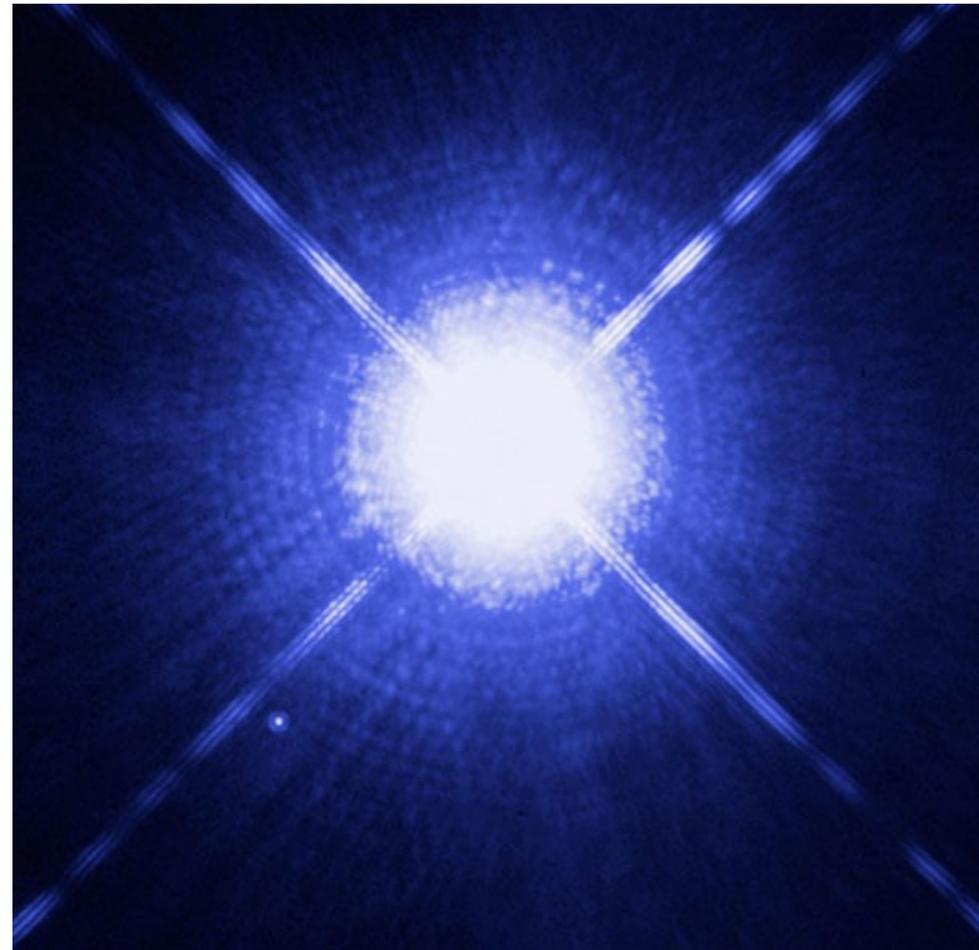
$$V_{\text{lib}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

Naine blanche

- La première naine blanche observée est Sirius B (Bessel 1844)
- Supernovae de type Ia



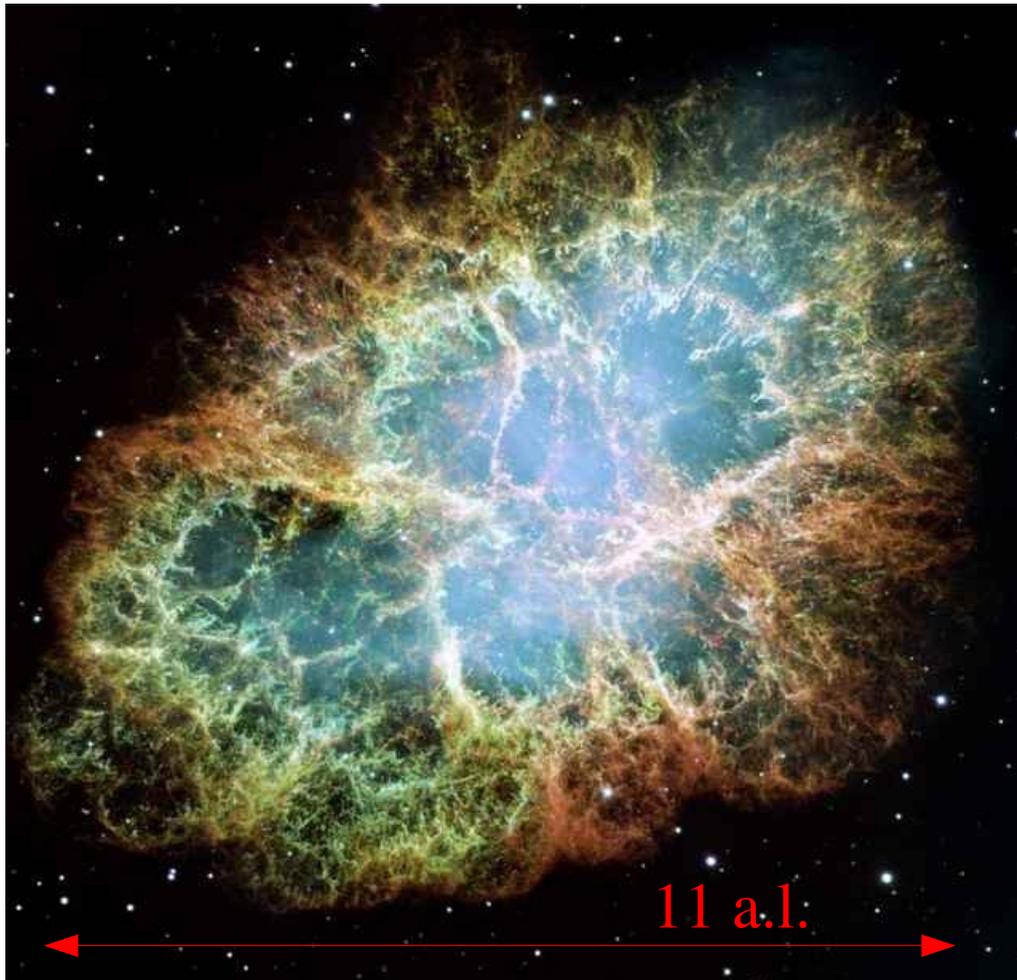
Amas M4



Etoile à neutrons

- 1932 : découverte du neutron par James Chadwick
- 1934 : F. Zwicky et W. Baade proposent l'existence d'étoiles à neutrons comme le résultat de l'effondrement gravitationnel d'étoiles massives
- 1967 : J. Bell et A. Hewish découvrent un signal périodique radio (PSR 1919+21, $P = 1.339\text{s}$)
- Seule une étoile très petite peut effectuer un tour en moins d'une seconde. La cohésion est assurée tant que le champ gravitationnel $G \cdot M/R^2$ est supérieur au champ centrifuge $R \cdot (2\pi/T)^2$
- Une étoile à neutrons est observable sous forme de pulsar

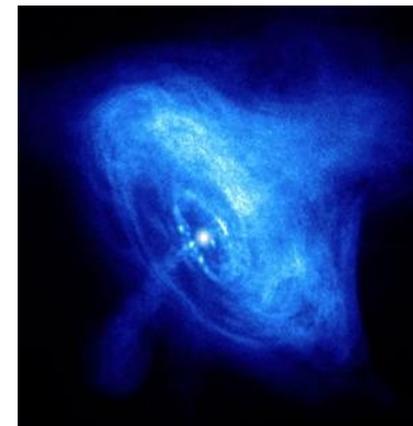
Pulsars



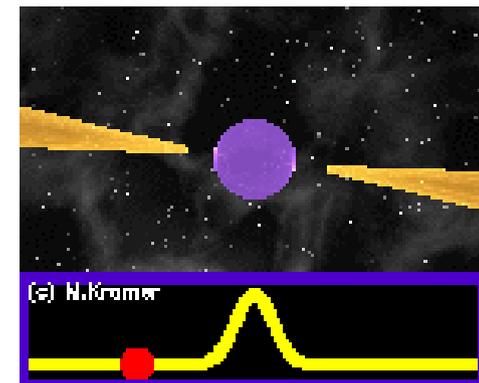
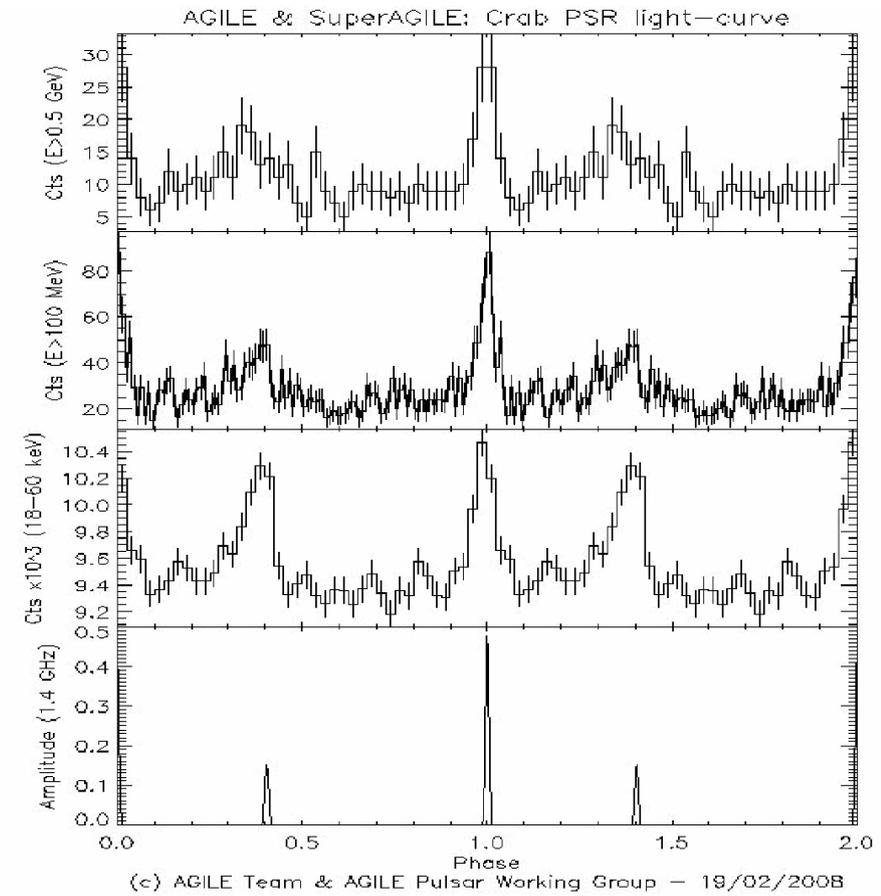
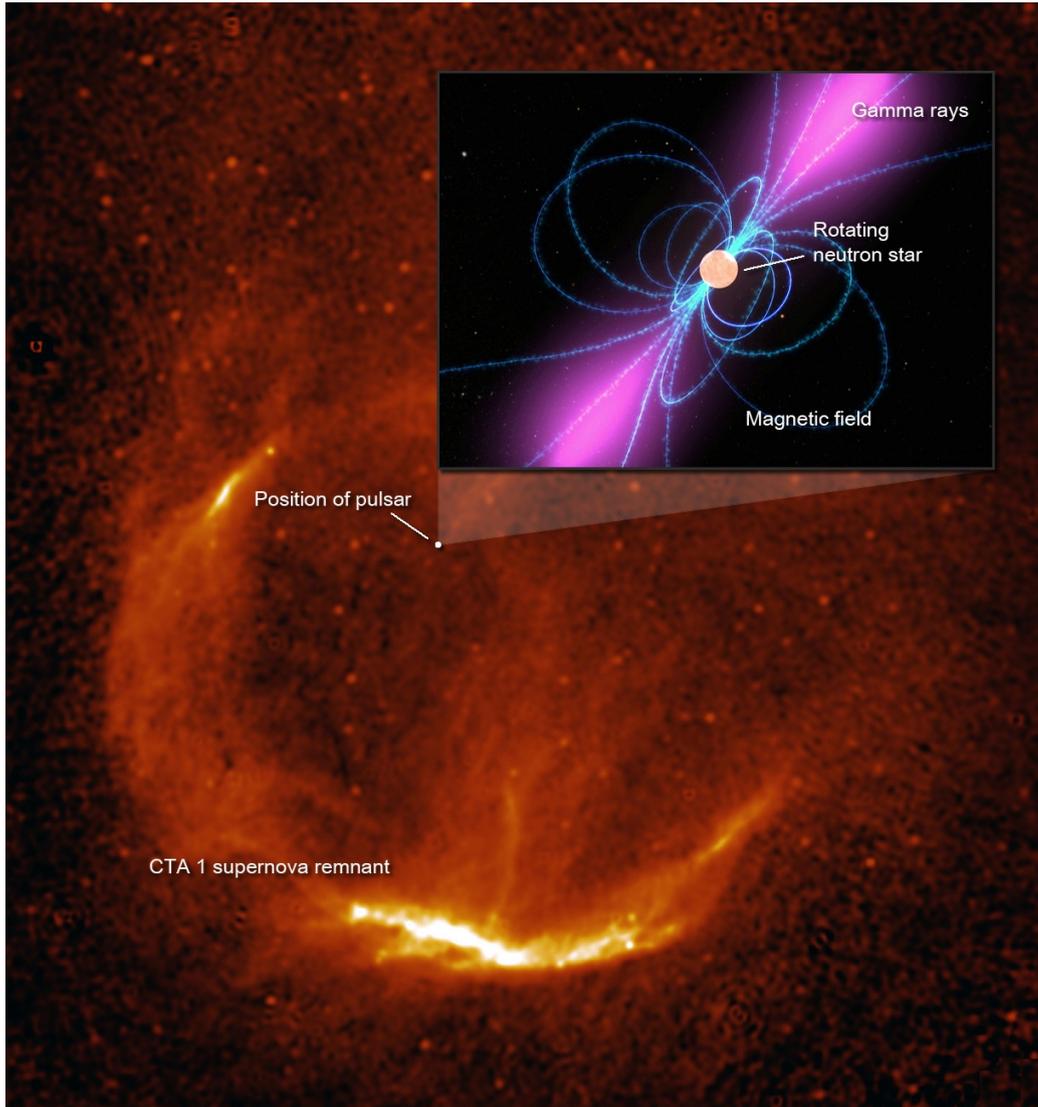
$d=2\text{kpc}$, $v_{\text{exp}}=1500\text{ km/s}$

Le Crabe

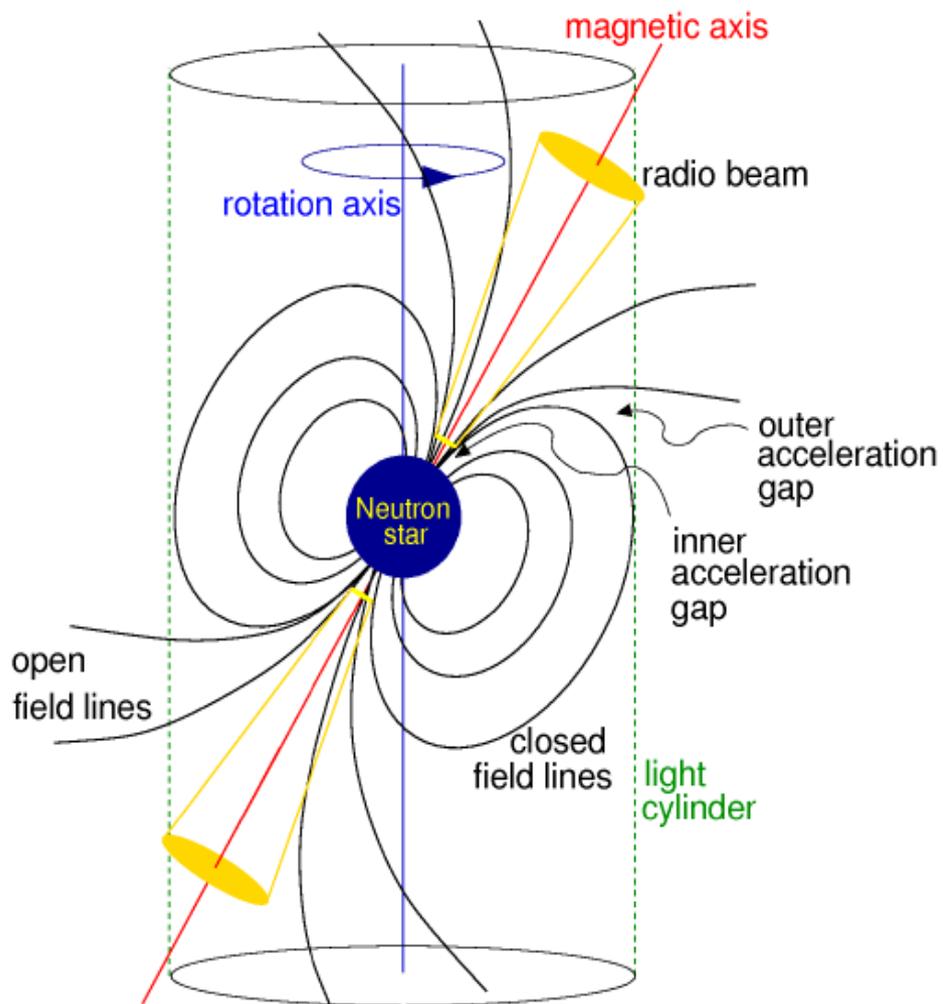
- Supernovae observée en 1054
- Source d'énergie de la nebuleuse



Pulsars

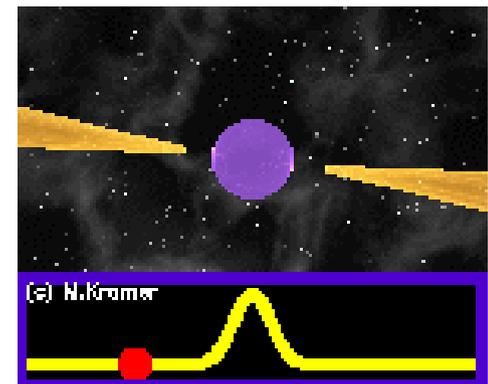


Propriétés

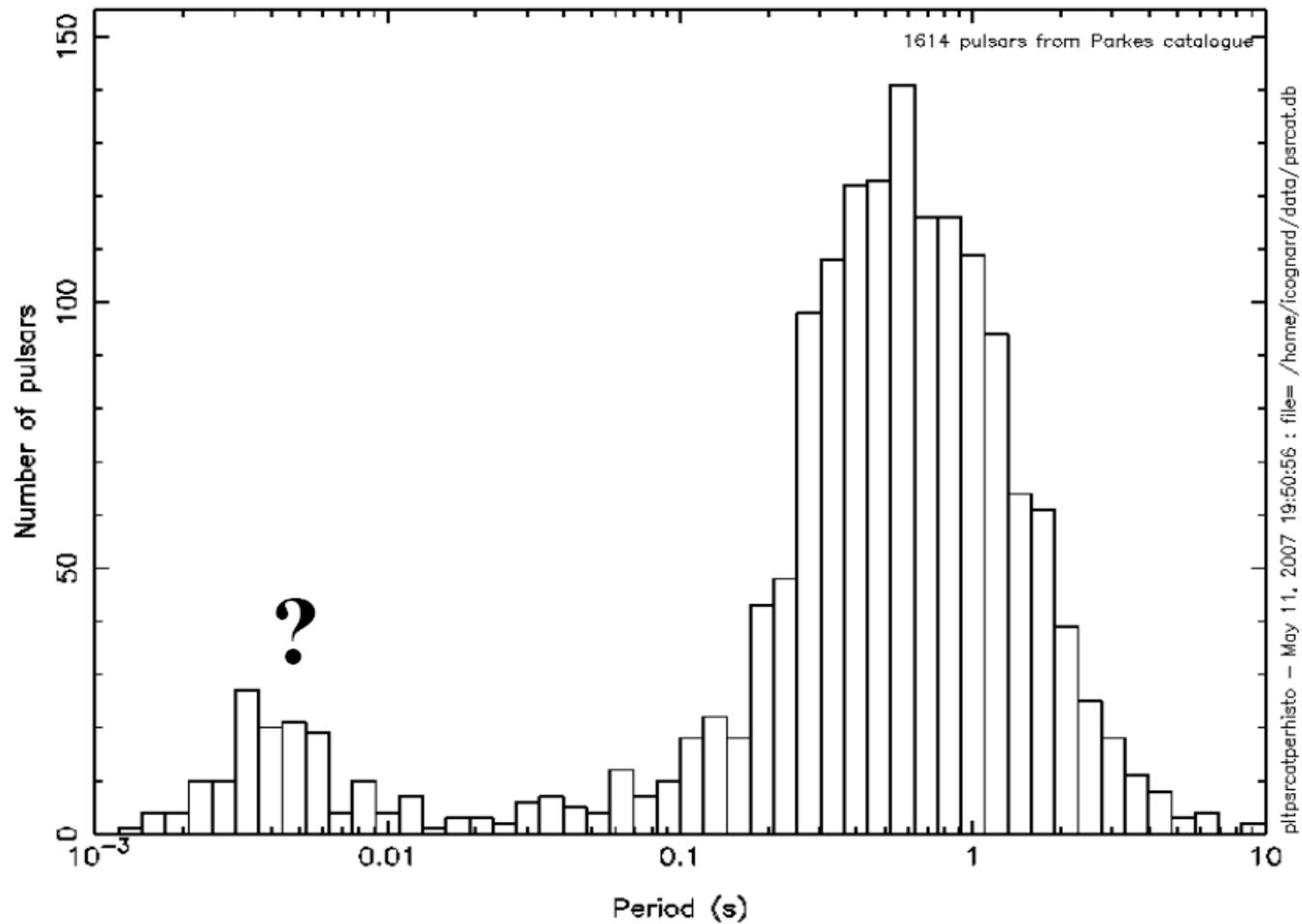


Handbook of Pulsar Astronomy' by Lorimer & Kramer

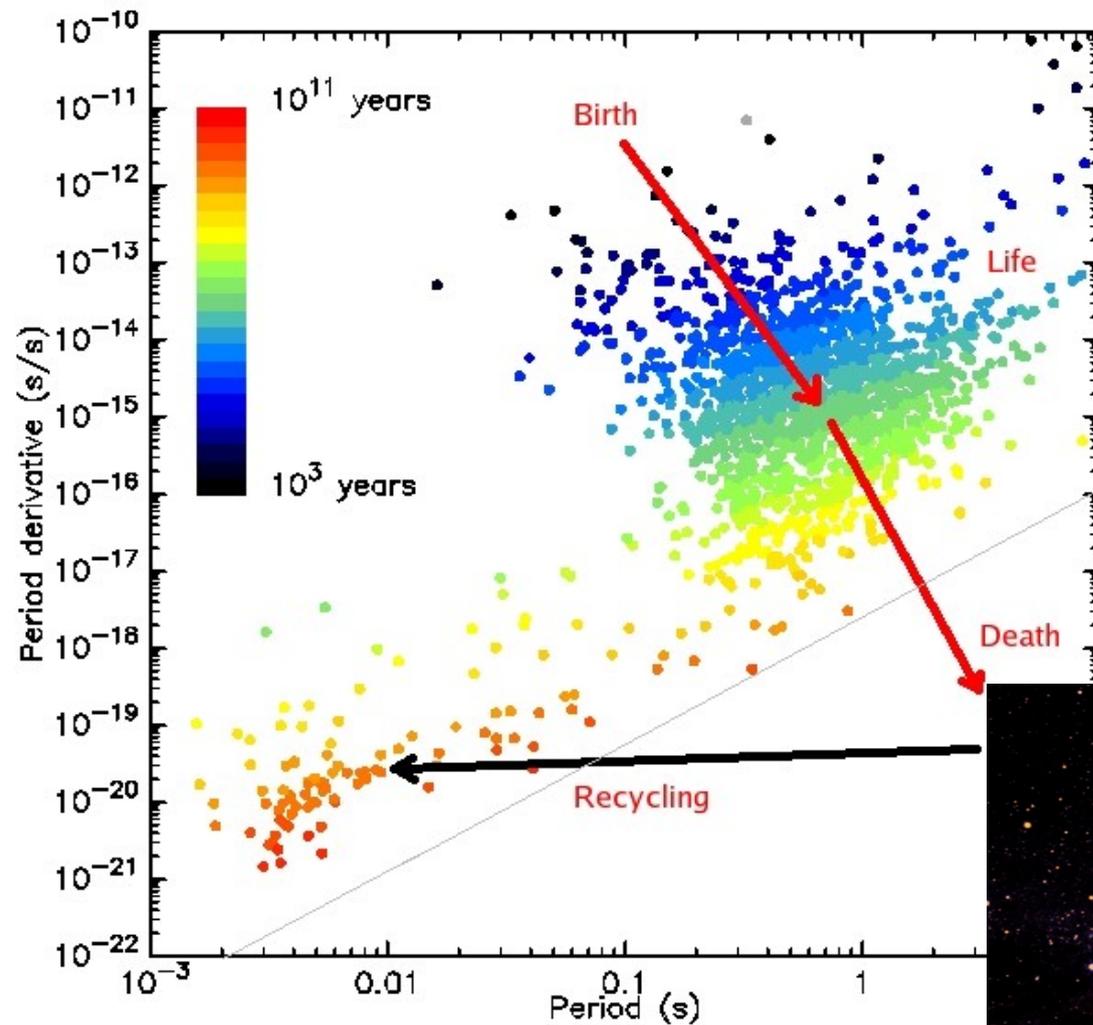
- Environ 1800 pulsars connus
- Champ B : conservation du flux magnétique, jusqu'à 10^{13} G
- $R \sim 15 M^{-1/3}$
- Calculer la densité moyenne pour $M = 1.44 M_{\text{sol}}$



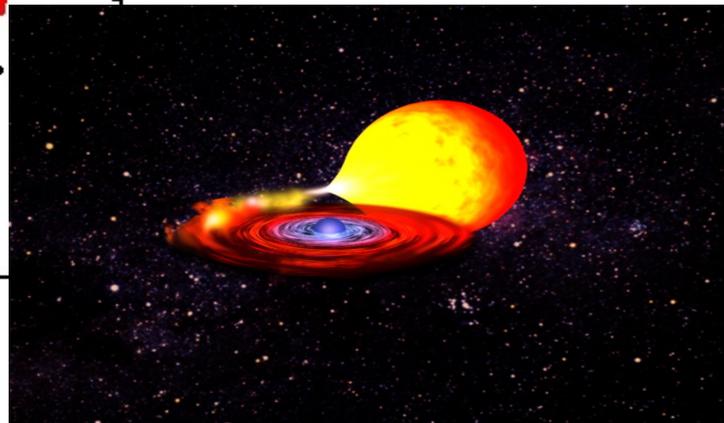
Distribution de la période



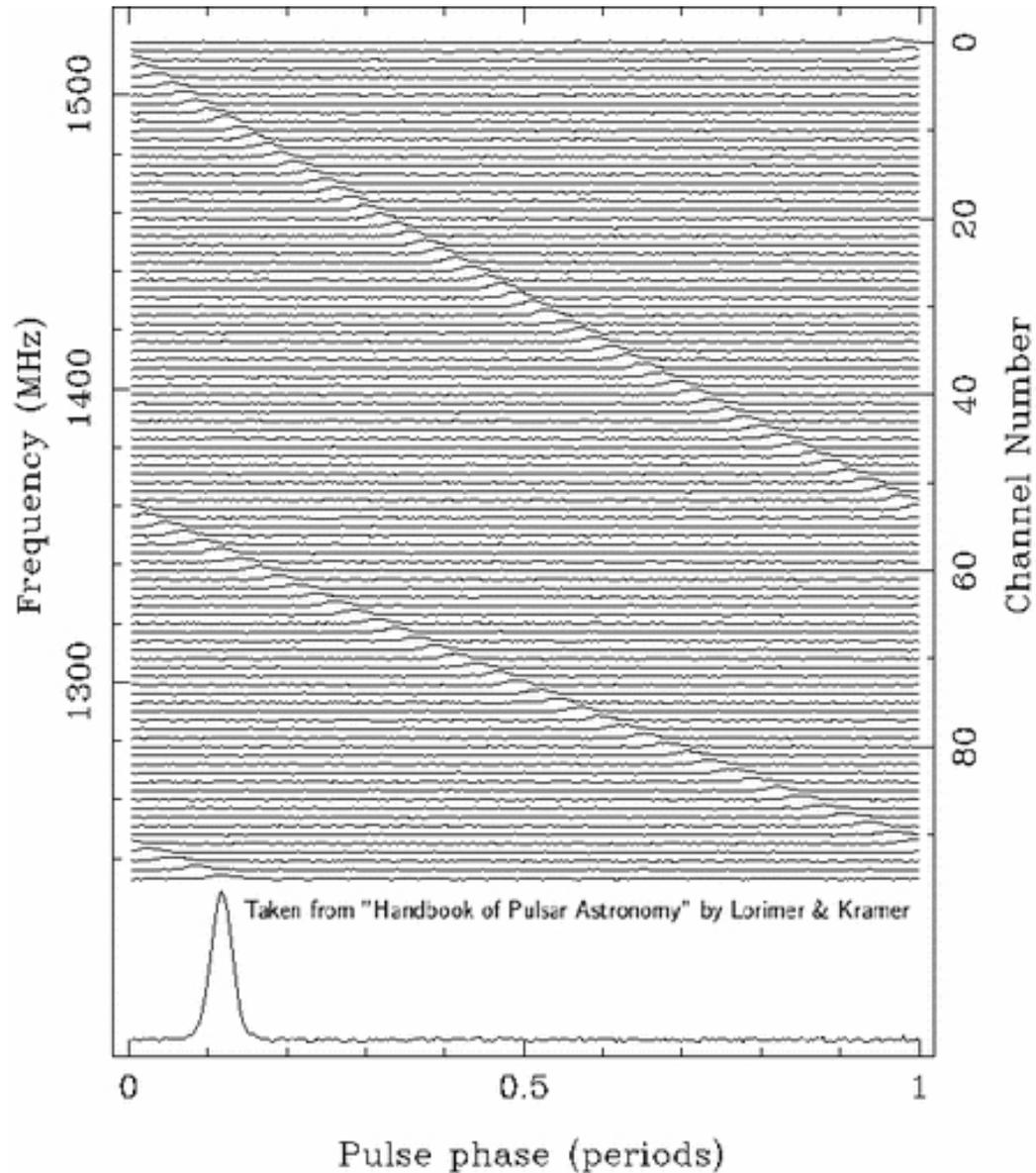
Pulsars millisecondes



Période : conservation du moment cinétique



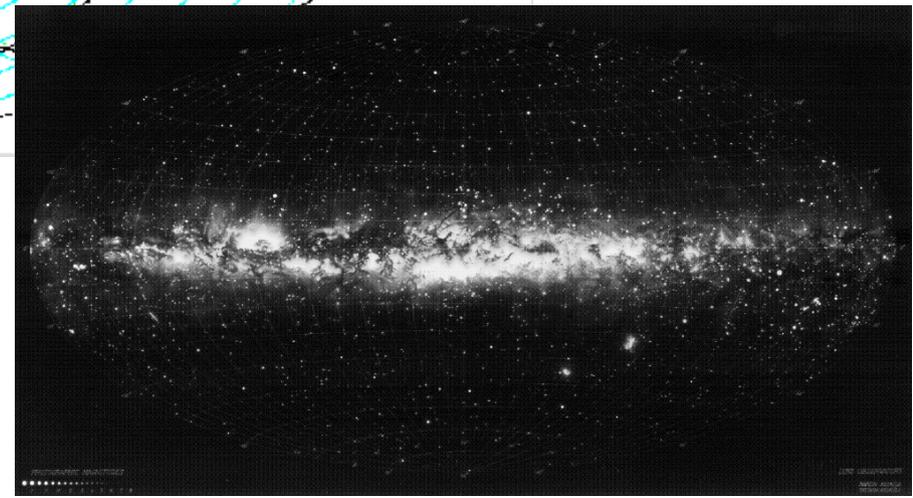
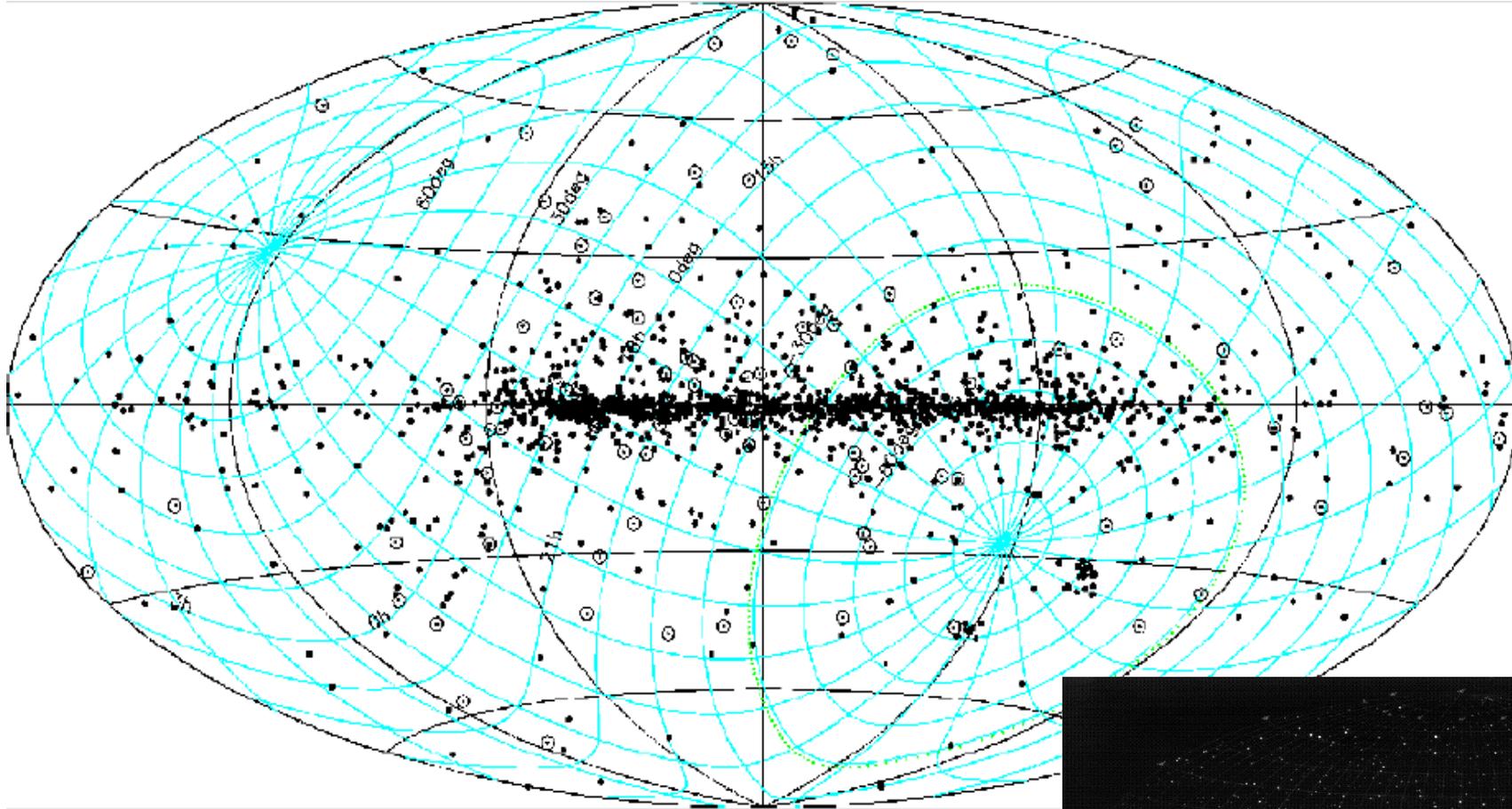
Dispersion par le milieu interstellaire



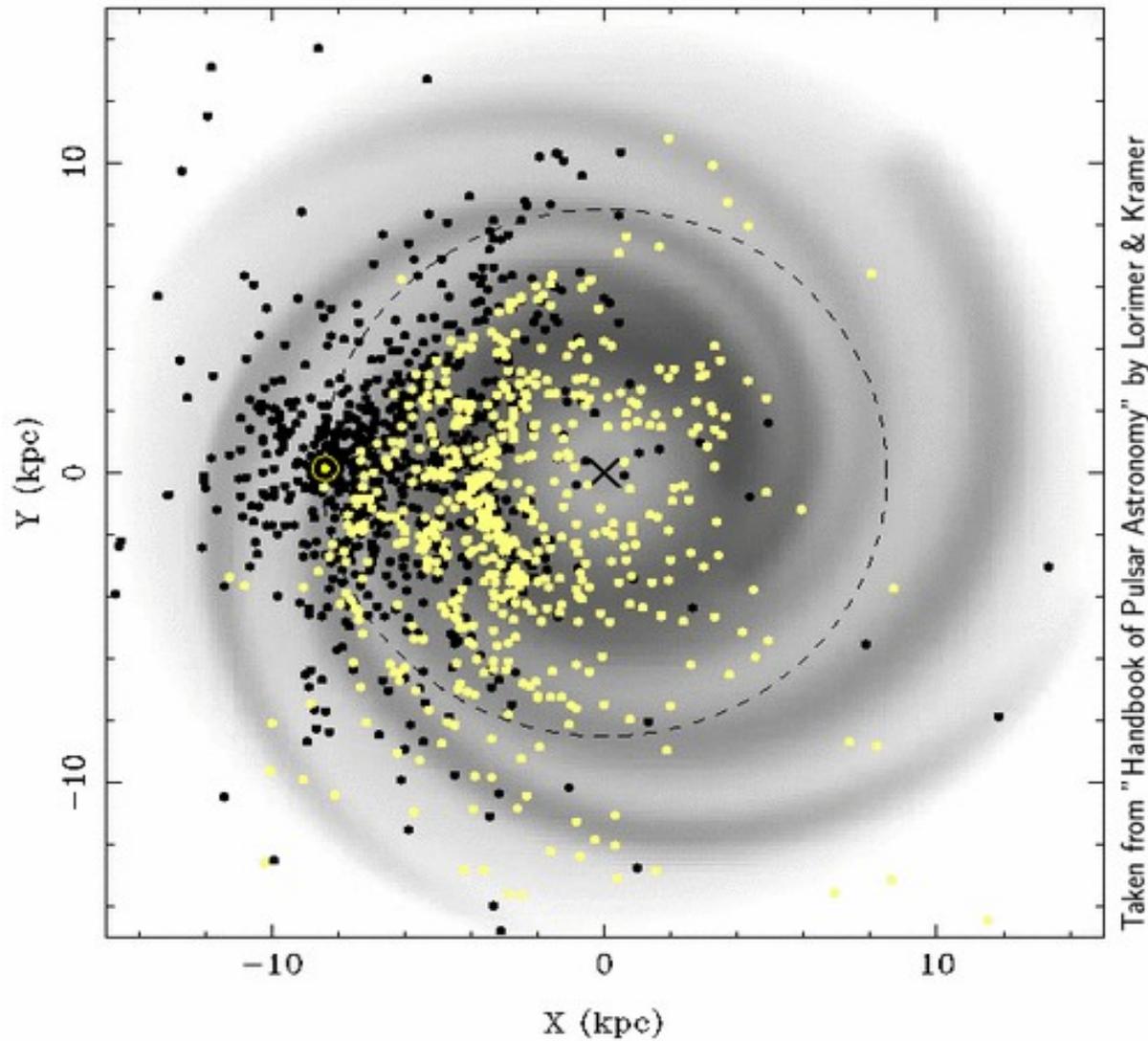
- Le milieu interstellaire est un plasma froid et ionisé

La propagation d'un signal radio est retardé d'un temps t
 $t = \text{cste} * \text{DM} / f^2$

Distribution spatiale

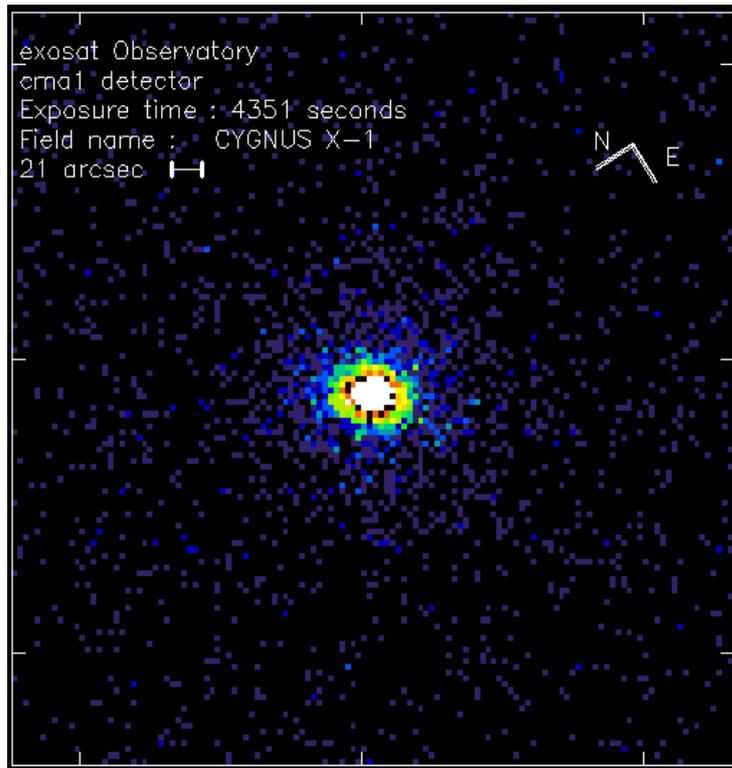


Distribution spatiale

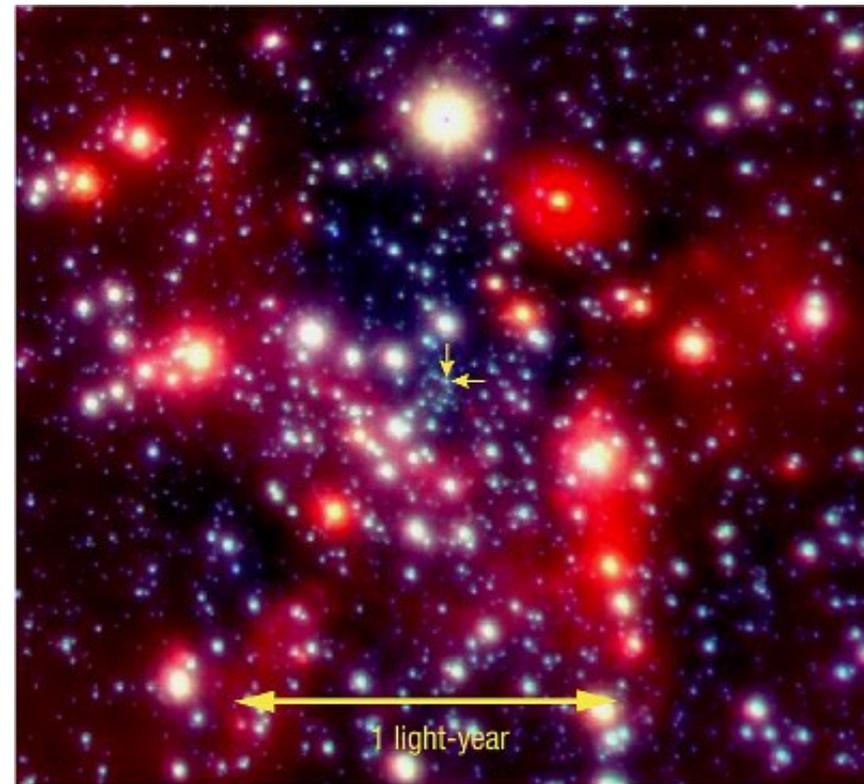


Trou noir

Les trous noirs ne sont pas directement observables



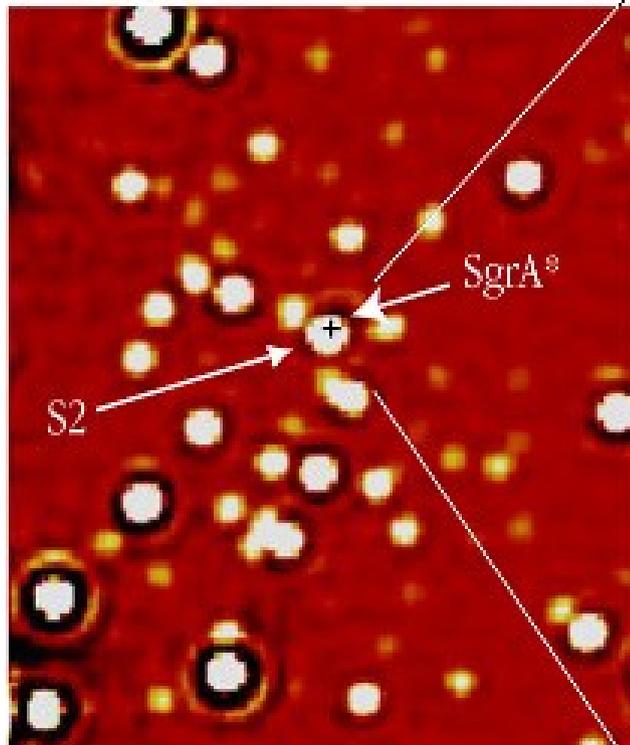
Cygnus-X



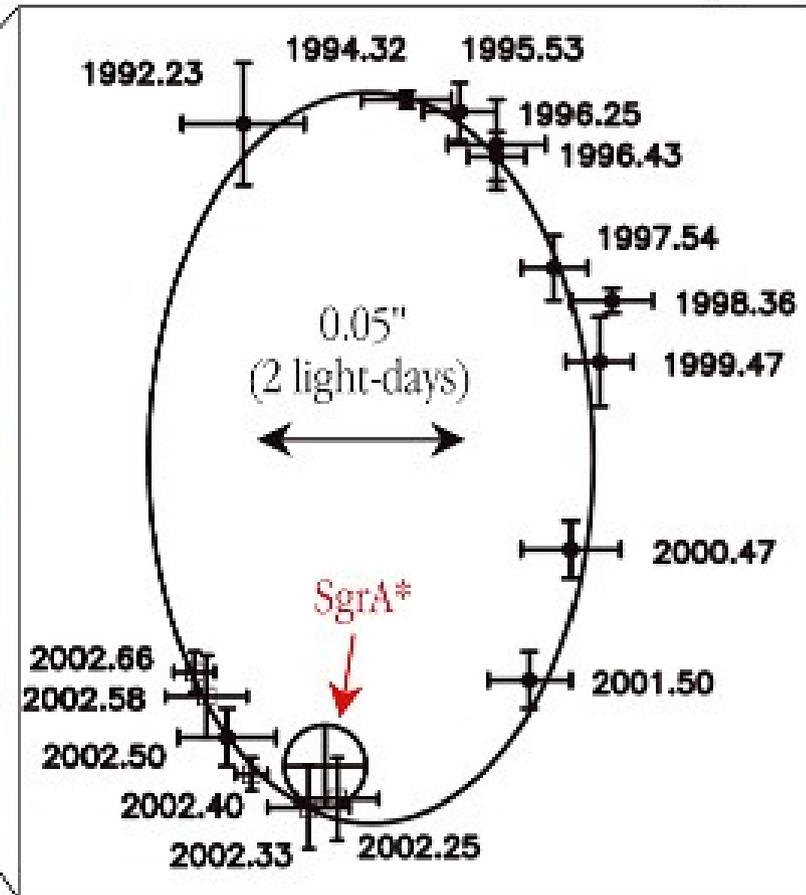
The Centre of the Milky Way
(VLT YEPUN + NACO)

Trou noir

NACO May 2002



S2 Orbit around SgrA*



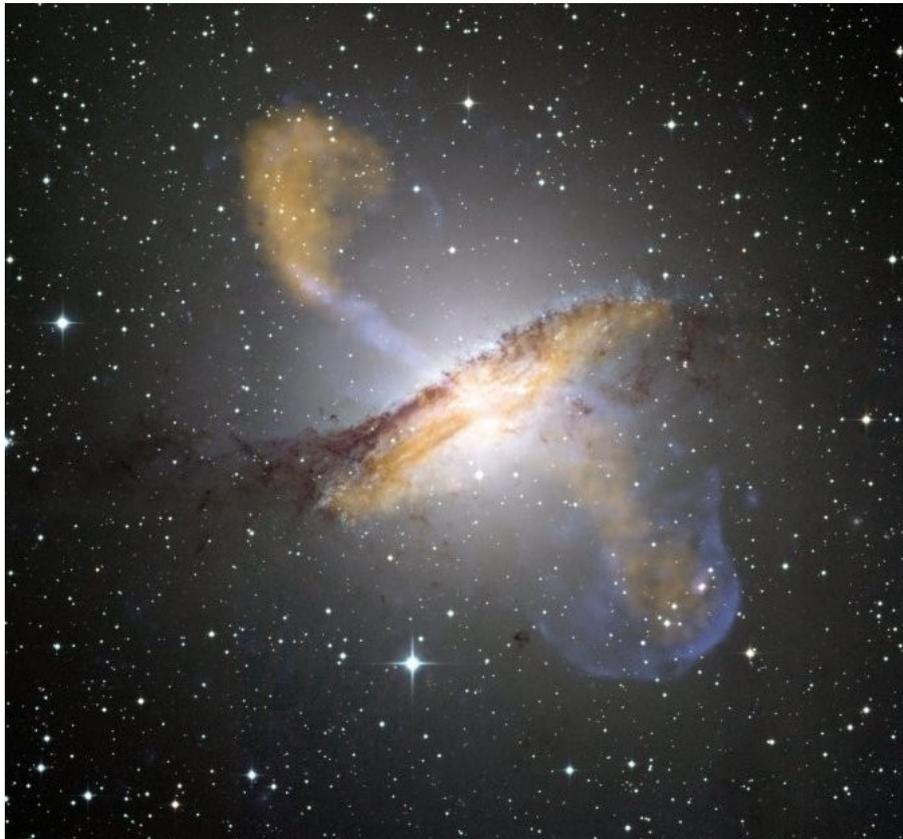
$M \sim 10^6 M_{\text{soleil}}$

The Motion of a Star around the Central Black Hole in the Milky Way

Trou noir

**Le trou noir central
de la galaxie Centaurus A**

$$M \sim 10^8 M_{\text{soleil}}$$



**Un modèle de trou noir
super-massif**

