

# Evolution stellaire

## Diagramme HR

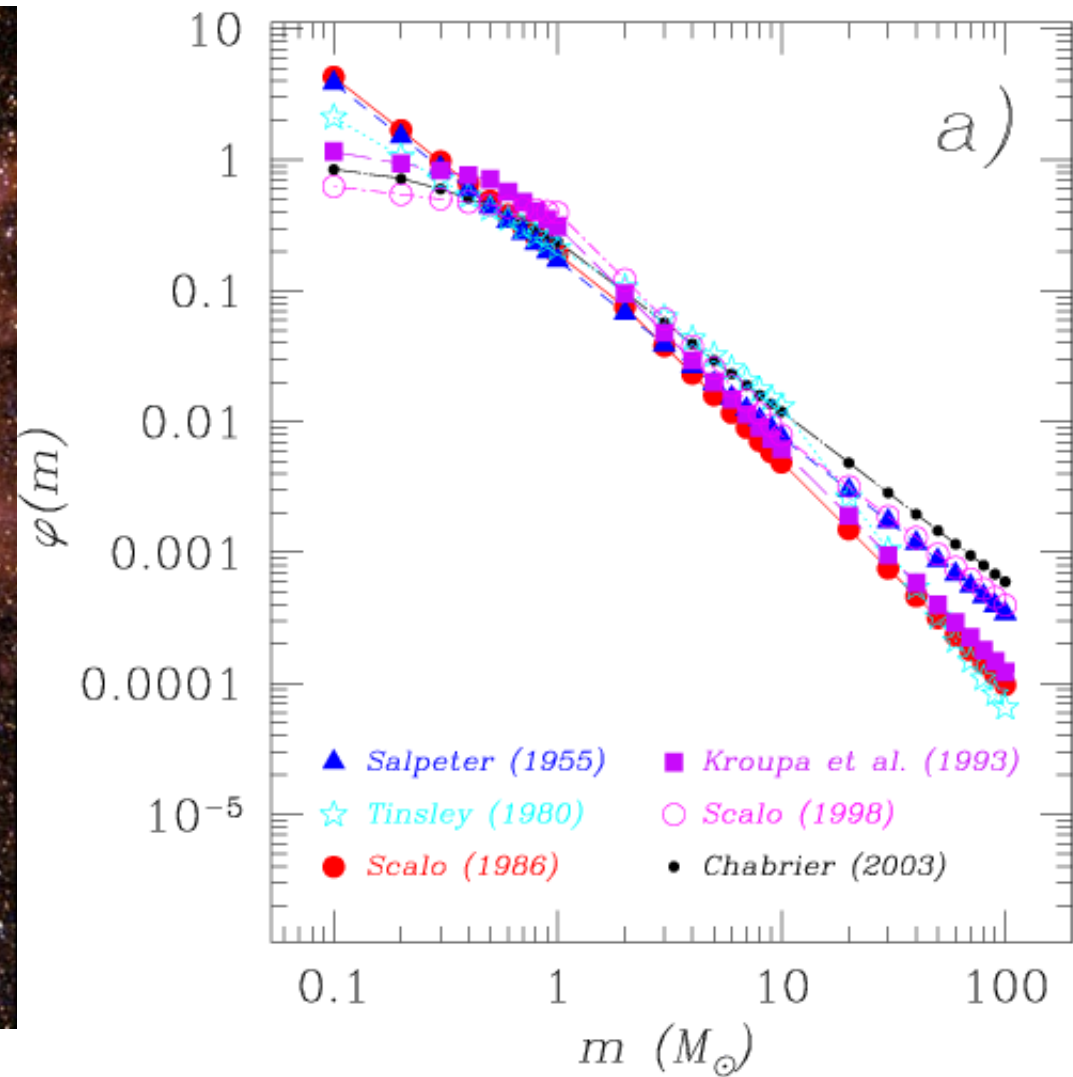
# Formation stellaire



Nuages  
Moléculaires  
Géants

# Fonction de masse initiale

- IMF : on forme plus d'étoile de faible masse
  - Initial Mass function:  $\varphi(m)dm$



# Evolution stellaire

- L'évolution des étoiles est contrôlée par un paramètre fondamental: leur masse
- Théorème de Russel-Vogt: si une étoile est en équilibre thermique et hydrostatique, et que la source d'énergie est nucléaire, ses propriétés sont définies par sa masse et sa composition chimique.
- Les caractéristiques des étoiles dépendent donc de leur masse, métallicité (abondance) et âge.

# Influence de la masse

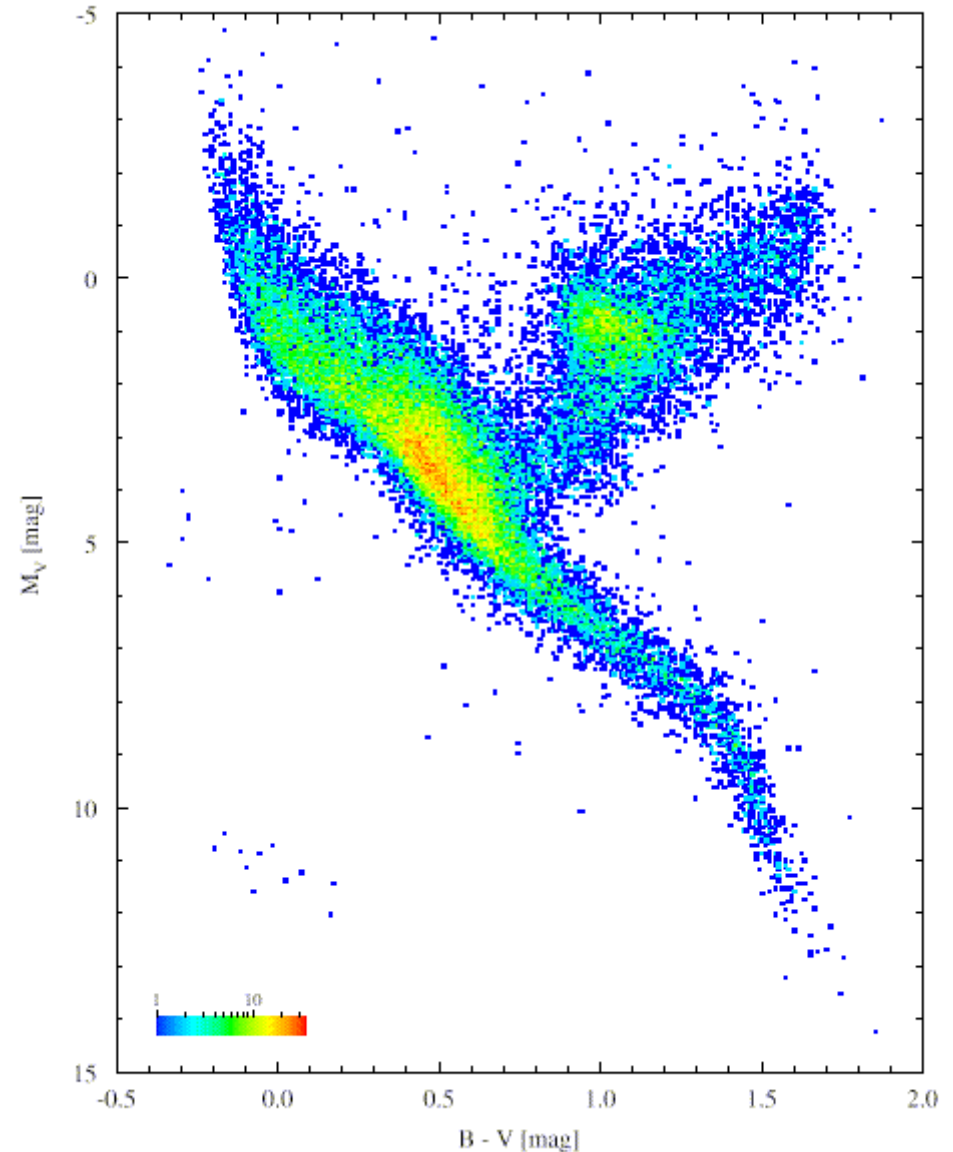
$$M_{\text{sun}} = M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30} \text{kg.}$$

Selon la masse  $M$  des objets formés:

- $M > \sim 8 M_{\text{sun}}$  : vie courte, nombreux cycles de réactions nucléaires, supernova
- $M > 1.2 M_{\text{sun}}$  : cycle CNO
- $0.4 M_{\text{sun}} < M < 1.2 M_{\text{sun}}$  : type solaire, combustion H- $\rightarrow$ He par chaîne P-P, et He via triple-alpha
- $0.085 M_{\text{sun}} < M < 0.4 M_{\text{sun}}$  : longue vie, pas de triple-alpha, ni combustion He
- $0.01 M_{\text{sun}} < M < 0.085 M_{\text{sun}}$  : naines brunes, pas de chaîne P-P, très peu lumineuses (IR)
- $M < 0.01 M_{\text{sun}}$  : planètes gazeuses – Jupiter ( $0.001 M_{\text{sun}}$ )

# Diagramme HR

- Diagramme de Hertzsprung-Russell
- Diagramme température-luminosité
- Image pour le voisinage solaire (HIPPARCOS)



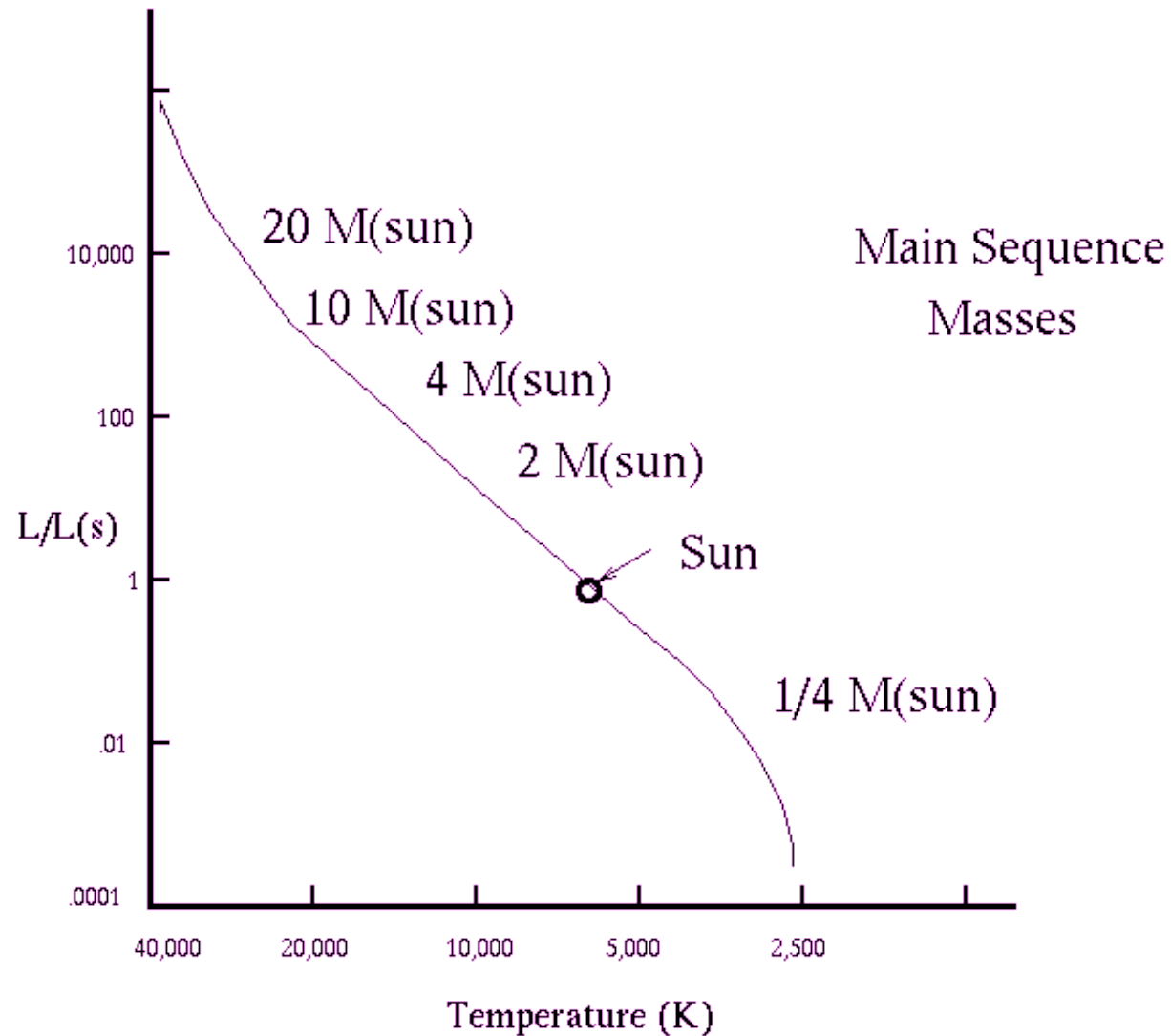
# Masse – Luminosité - Température

- Masse et luminosité sont reliées par une relation

$$L \sim M^{3.5}$$

- La quantité de carburant disponible est proportionnelle à la masse, donc la durée de vie d'une étoile est  $\sim M^{-2.5}$ 
  - 10 masses solaire : 30 M ans
  - soleil :  $10^{10}$  ans
  - 0.75 masses solaires:  $>$  âge univers

# Séquence principale

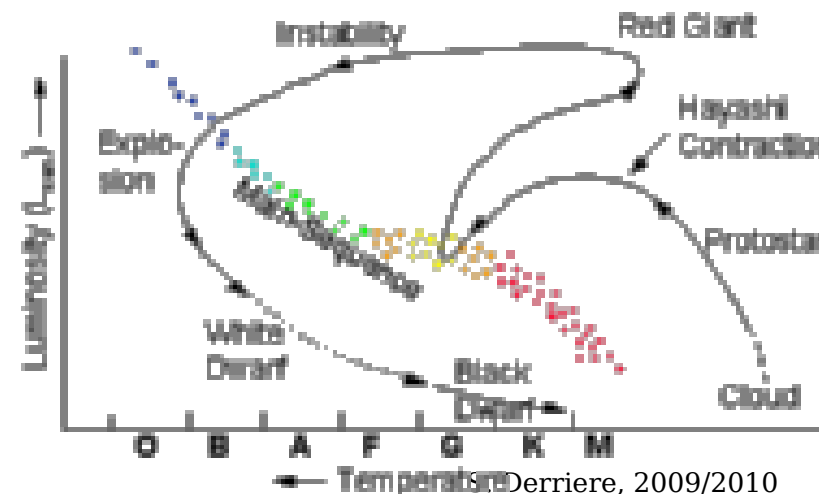


# Evolution des étoiles

- Etoile de type solaire
- Etoile massive

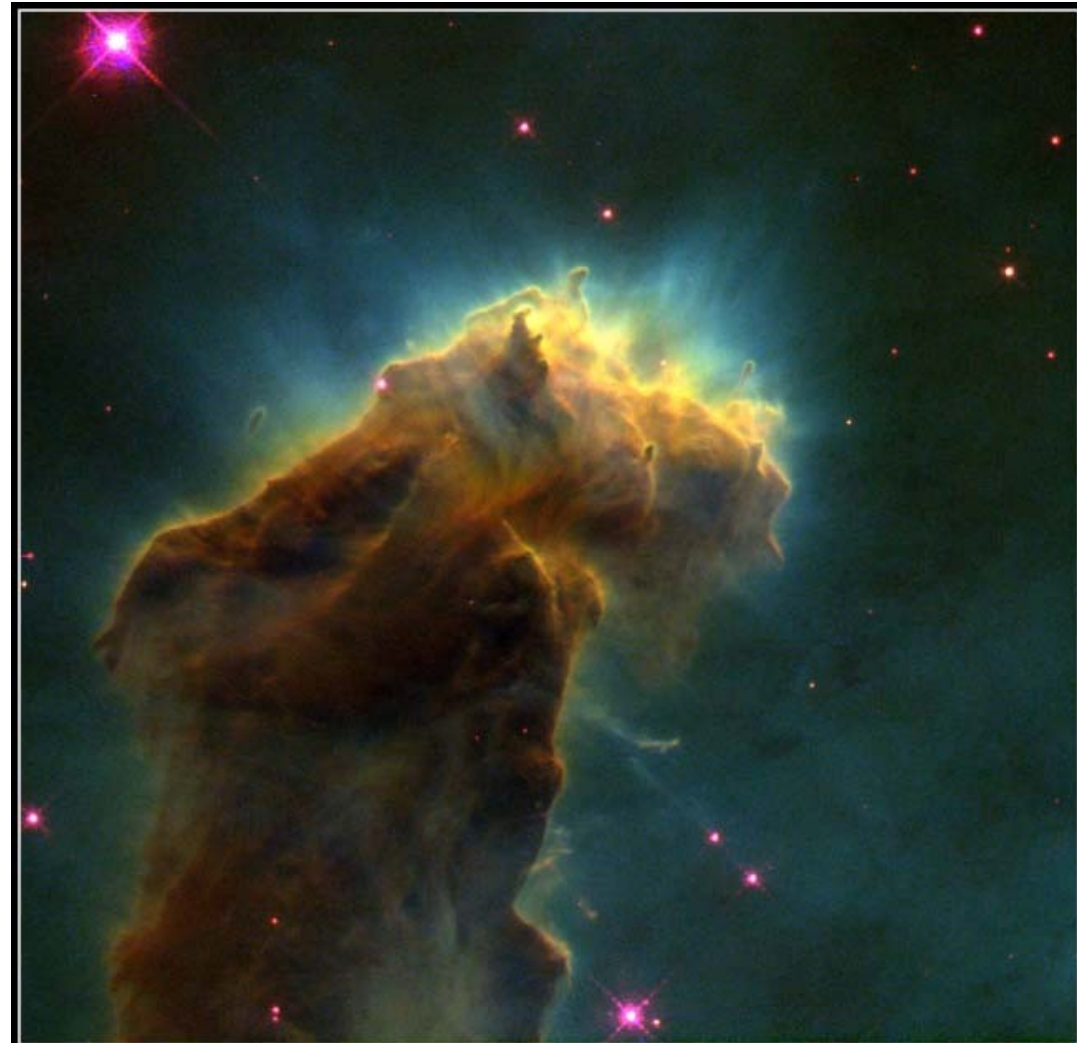
# Evolution des étoiles de type solaire

- 1) Proto-étoile
- 2) Pré-séquence principale
- 3) ZAMS (Zero Age Main Sequence)
- 4) Départ de séquence principale
- 5) Géante rouge – flash de l'Hélium
- 6) Combustion de l'Hélium
- 7) Nébuleuse planétaire
- 8) Naine blanche



# Proto-étoile

- Condensation dans un nuage moléculaire
- Effondrement rapide
  - $PV = NRT$
- Rapide = quelques milliers d'années



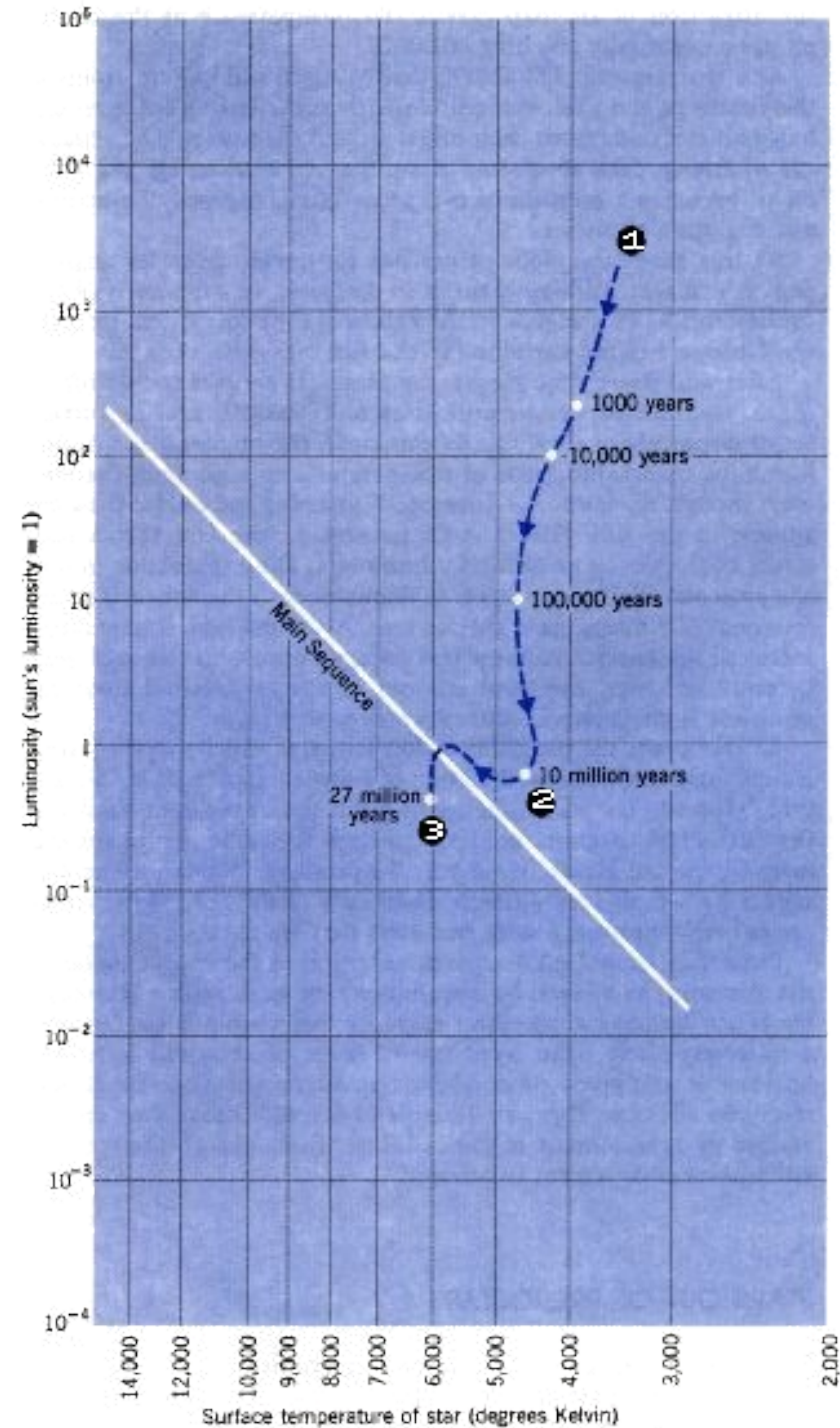
**Star-Birth Clouds · M16**

HST · WFPC2

PRC95-44b · ST ScI OPO · November 2, 1995  
J. Hester and P. Scowen (AZ State Univ.), NASA

# Proto-étoile

- $R \sim 50 R_{\text{sun}}$
- $T_{\text{surf}} = 3500\text{K}$
- $T_{\text{core}} = 0.15 \cdot 10^6\text{K}$
- Contraction gravitationnelle

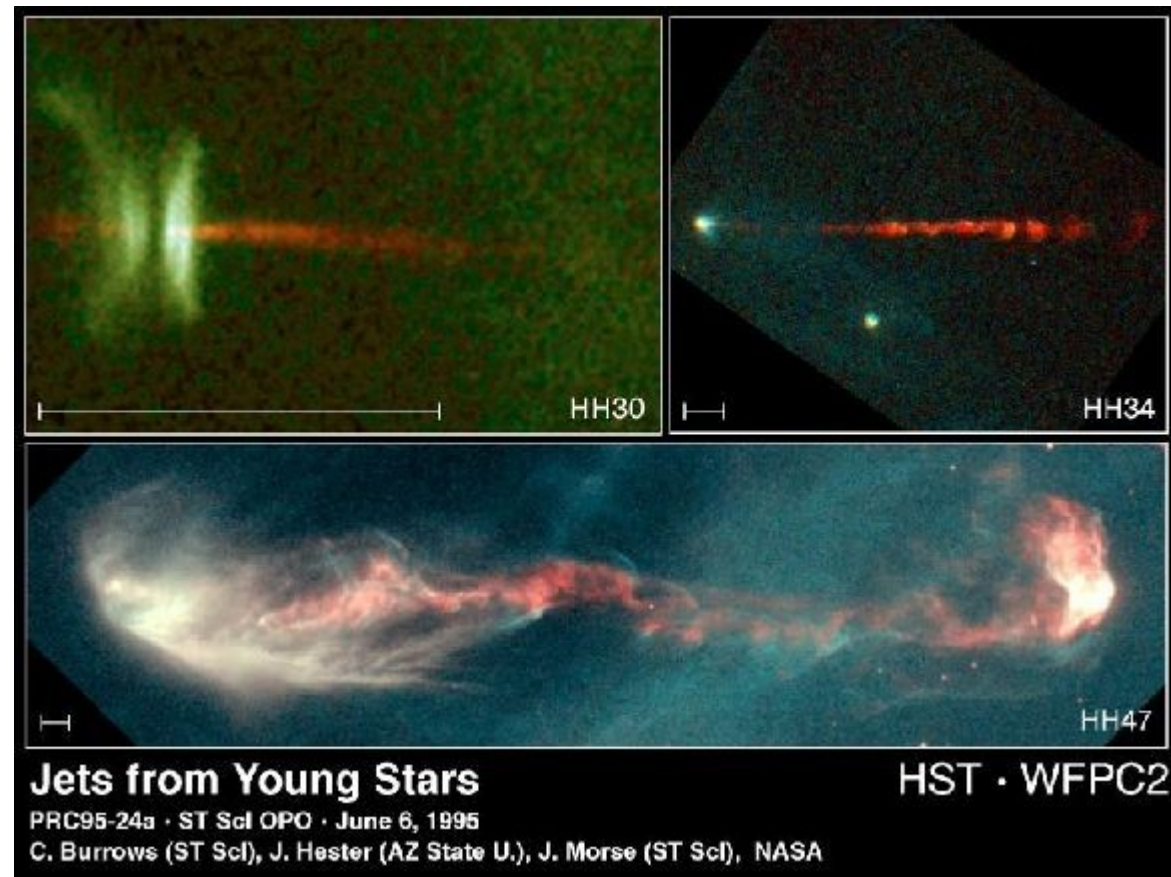


# Pré-séquence principale

- Equilibre hydrostatique quasi atteint
- La contraction continue jusqu'au démarrage des réactions nucléaires dans le coeur
- Etoiles T-Tauri : activité intense
  - vents
  - jets

# Pré-séquence principale

- $R \sim 1.33 R_{\text{sun}}$
- 10 millions d'années
- $T_{\text{surf}} = 4500\text{K}$
- $T_{\text{core}} = 10^7 \text{K}$
- Démarrage de la chaîne P-P



# ZAMS

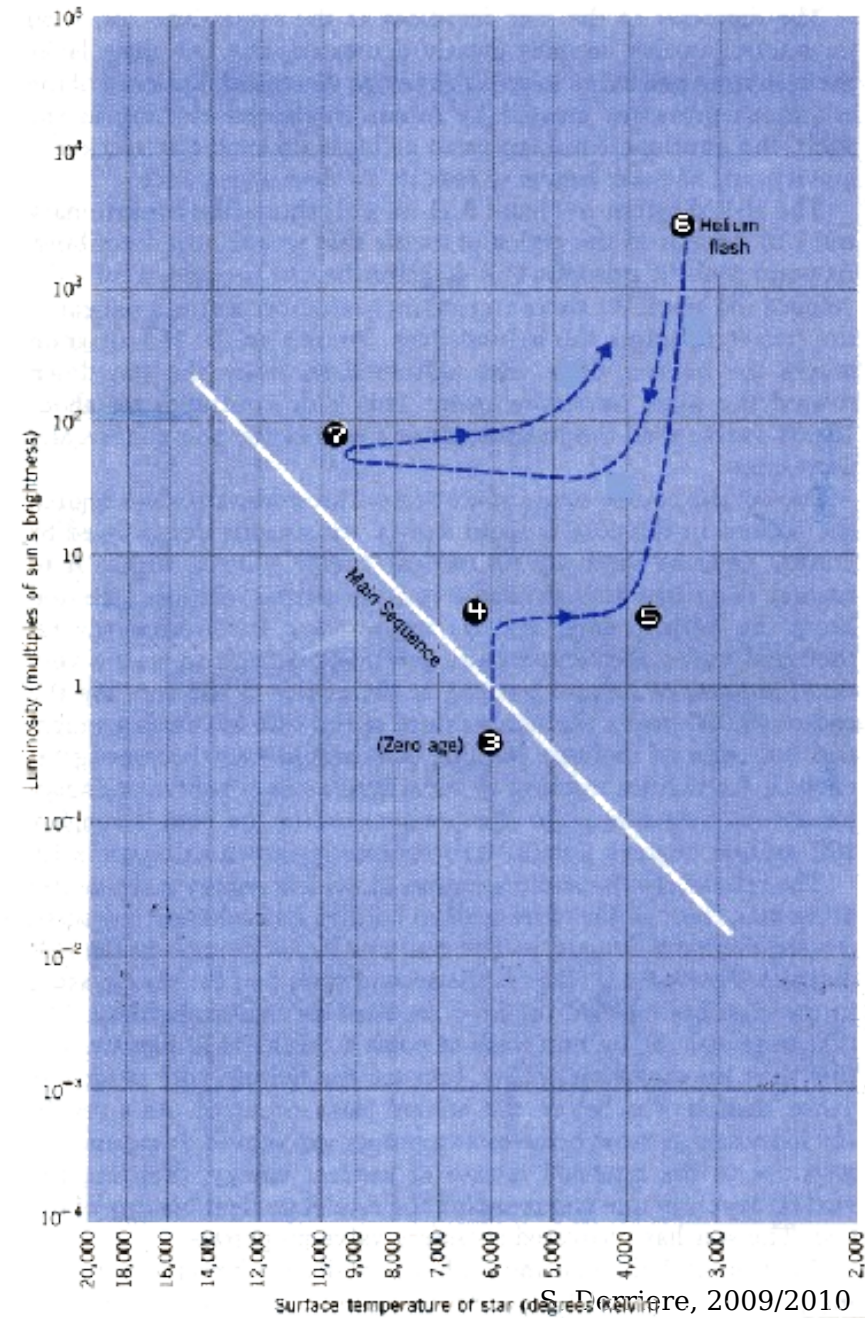
- Encore quelques millions d'années, et l'étoile se situe dans la partie basse de la séquence principale
- Transmutation H  $\rightarrow$  He efficace : la séquence principale est la phase la plus longue dans l'évolution stellaire
- $R \sim R_{\text{sun}}$
- $T_{\text{surf}} = 6000\text{K}$  -  $T_{\text{core}} = 1.5 \cdot 10^7 \text{K}$
- Chaîne P-P dans le coeur

# Séquence principale

- Radiation  $L \sim R^2 T^4$  (perte d'énergie)
- Réactions nucléaires dépendent fortement de la température du coeur ( $\sim T^4$  pour P-P)
- Equilibre  $PV = NRT$
- Fin de la séquence principale vers  $10^{10}$  ans pour une étoile d'une masse solaire

# Départ de la séquence principale

- Dure environ  $10^9$  ans
- $R \sim 2.6 R_{\text{sun}}$
- $T_{\text{surf}} = 4500\text{K}$
- Chaîne P-P dans les couches supérieures, et contraction du coeur



# Géante rouge

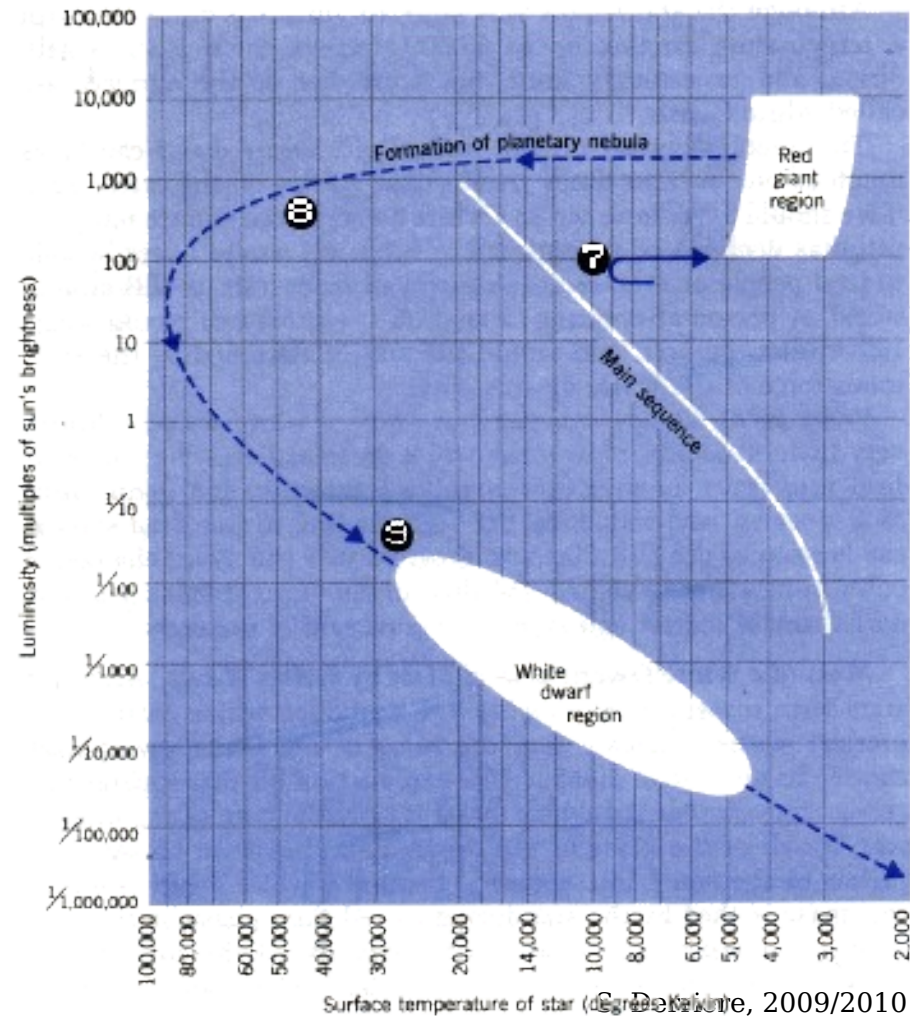
- Dure environ  $10^8$  ans
- Contraction du coeur (He) libère de l'énergie qui gonfle l'enveloppe stellaire
- $R \sim 200 R_{\text{sun}}$
- $T_{\text{surf}} = 3500\text{K} - T_{\text{core}} = 2 \cdot 10^8 \text{ K}$
- Chaîne P-P dans les couches sup.
- Pression dans le coeur = pression de dégénérescence des électrons (principe d'exclusion de Pauli) – indépendante de T
- Fusion de He (processus triple-Alpha)

# Combustion de l'Hélium

- He  $\rightarrow$  C (triple Alpha)
- Processus libérant moins d'énergie que la combustion de H:

dure  $\sim 2 \cdot 10^9$  ans

- $^{12}\text{C} + ^4\text{He} \rightarrow ^{16}\text{O}$

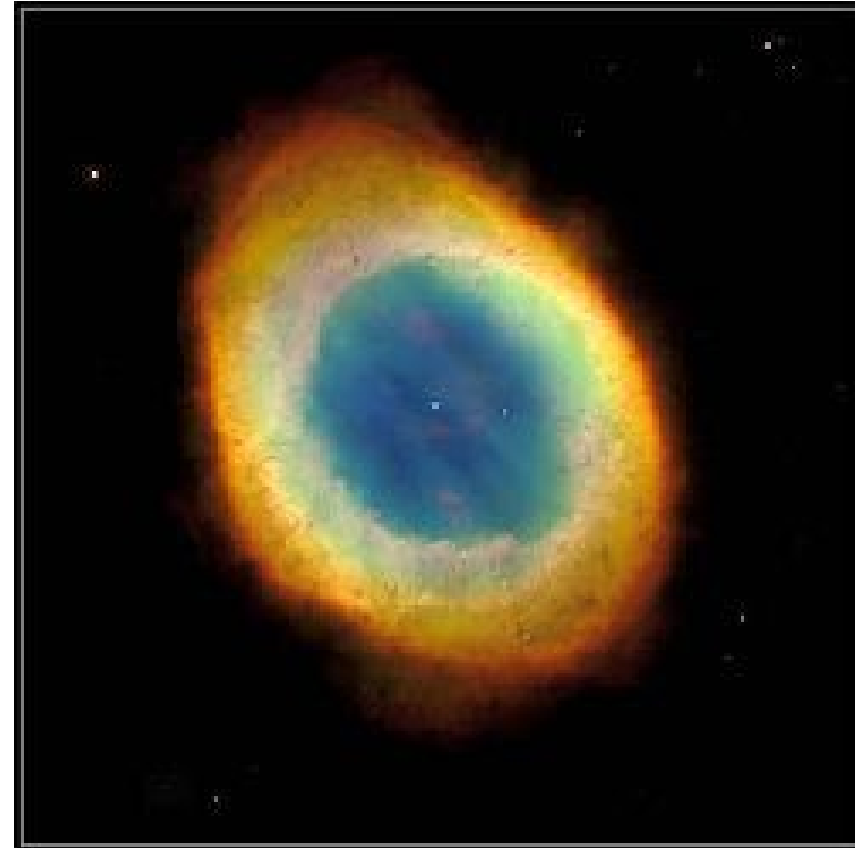


# Nébuleuse planétaire

- Quand plus d'He dans le coeur d'une étoile de masse solaire, plus de réactions possibles...
- Coeur C-O se contracte
- Combustion He et H dans les couches au dessus du coeur
- Ejection de  $\sim 10\%$  de sa masse (enveloppe extérieure)

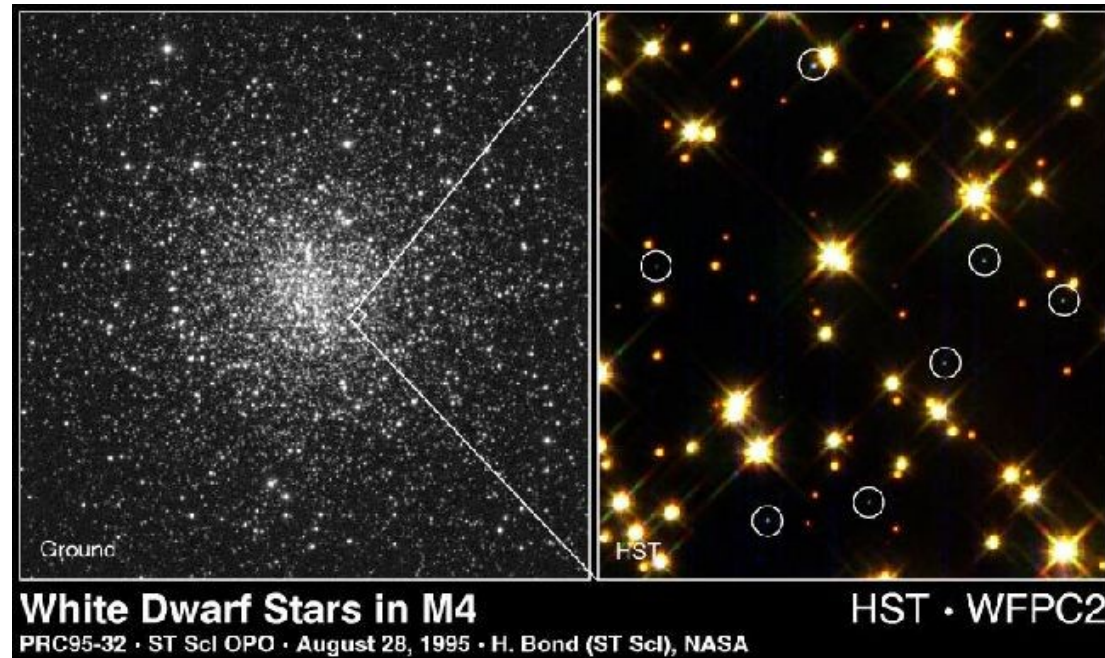
# Nébuleuse planétaire

- Phase rapide (25 000 ans)
- Révèle les parties internes ( $T \sim 10^5 \text{K}$ )
- Interaction de l'enveloppe éjectée avec vent stellaire des phases précédentes



# Naine blanche

- La nébuleuse se disperse:  
reste un résidu stellaire,  
supporté par la  
dégénérescence  
électronique
- $R \sim R_{\text{terre}}$  forte densité
- $T_{\text{surf}} = 30000\text{K} - 5000\text{K}$
- Refroidissement lent

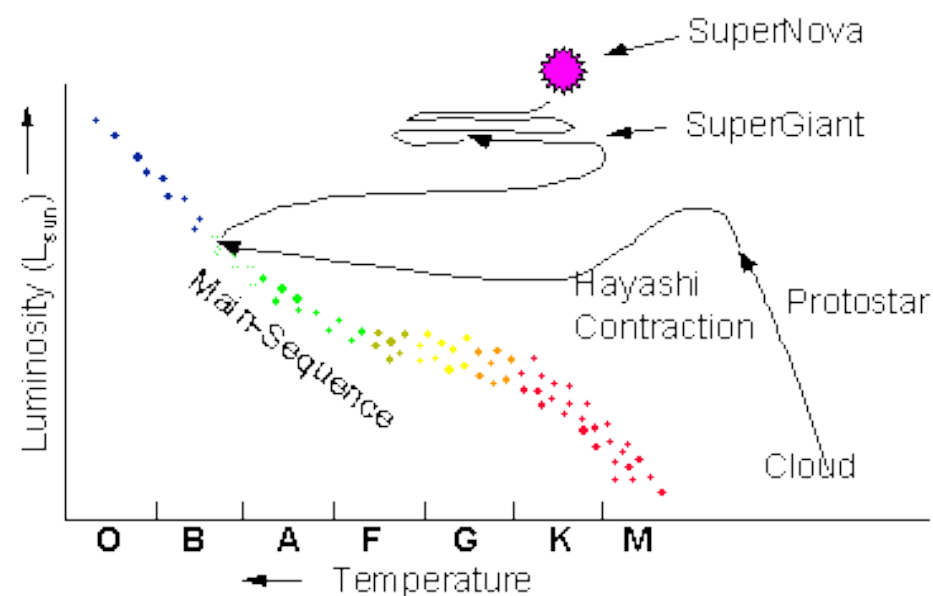
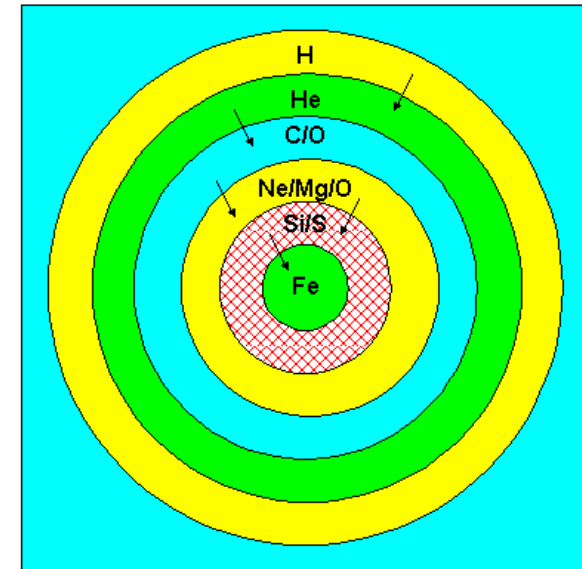


# Evolution des étoiles massives

- Pression gravitationnelle plus grande: plus grandes températures internes
  - utilisation du cycle CNO pour la transformation H --> He
- Pas de flash de l'Hélium
- Températures du coeur plus élevées: réactions nucléaires pour des éléments plus lourds, jusqu'au Fe
- Masse du coeur supérieure à  $1.4M_{\text{sun}}$  (limite de Chandrasekhar pour une naine blanche) : fin de vie explosive

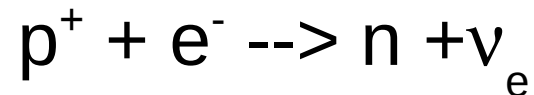
# Supernovae

- Les différentes étapes de combustions nucléaires créent une structure en peau d'oignon
- Chaque étape est plus courte que la précédente
  - séq. ppale: 10Myr
  - He ( $3\alpha$ ) : 1Myr
  - C : 300 yr
  - O : 2/3 yr
  - Si : 2 jours



# Supernovae

- Les réactions s'arrêtent au fer (noyau le plus stable)
- Le coeur s'effondre et n'est pas supporté par la pression de dégénérescence des électrons



- Arrêt de l'effondrement brutal (dégénérescence des neutrons), et rebond des couches superficielles
  - reste une étoile à neutrons dans le coeur
  - expulsion des couches superficielles
  - énorme libération d'énergie

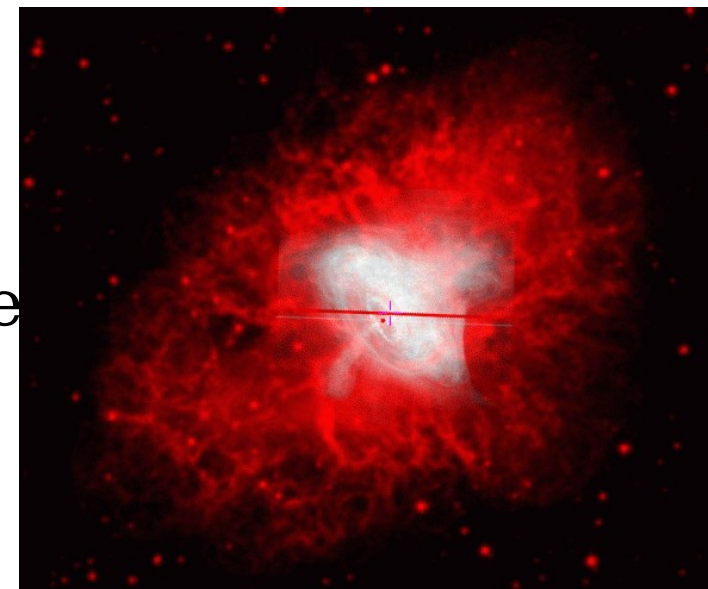
# Supernovae

- Le résidu stellaire est petit  $R \sim 10\text{km}$ , avec la densité d'un noyau atomique
- Pulsars:
  - rotation rapide (conservation moment angulaire)
  - champ magnétique intense

SN  
1987 A

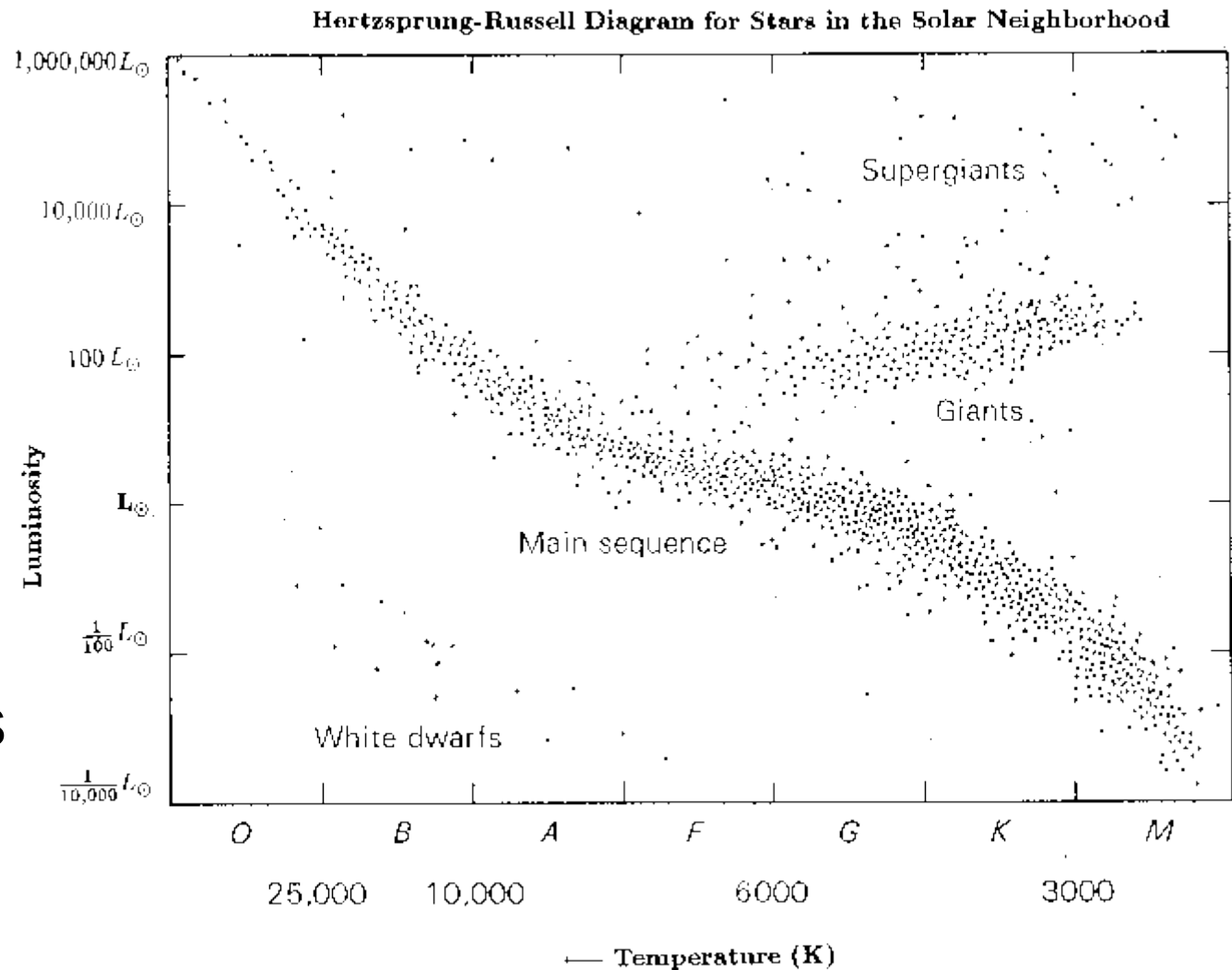


Nébuleuse  
du crabe



# Diagramme HR

- Types spectraux  
OBAFGKM
- Classes de Luminosité  
I, II =  
supergéantes  
III, IV = géantes  
V = naines





O



T > 30,000 K, raies He+

B



T = 11,000-30,000K  
He neutre

A



T = 7500-11,000K  
H Intense

F



T = 5900-7500K  
H faiblit, Ca+ intense

G



T = 5200-5900K,  
Ca+ et Fe+,  
metaux

K



T = 3900-5200K,  
fortes raies  
métalliques

M



T = 2500-3900K,  
bandes  
moléculaires

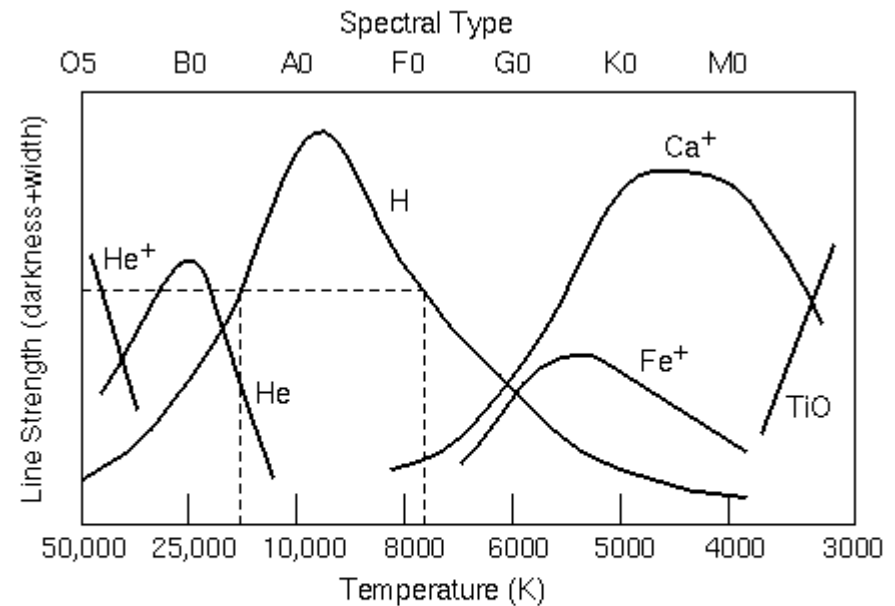
L



T = 1500-2300K,  
fortes bandes mol.

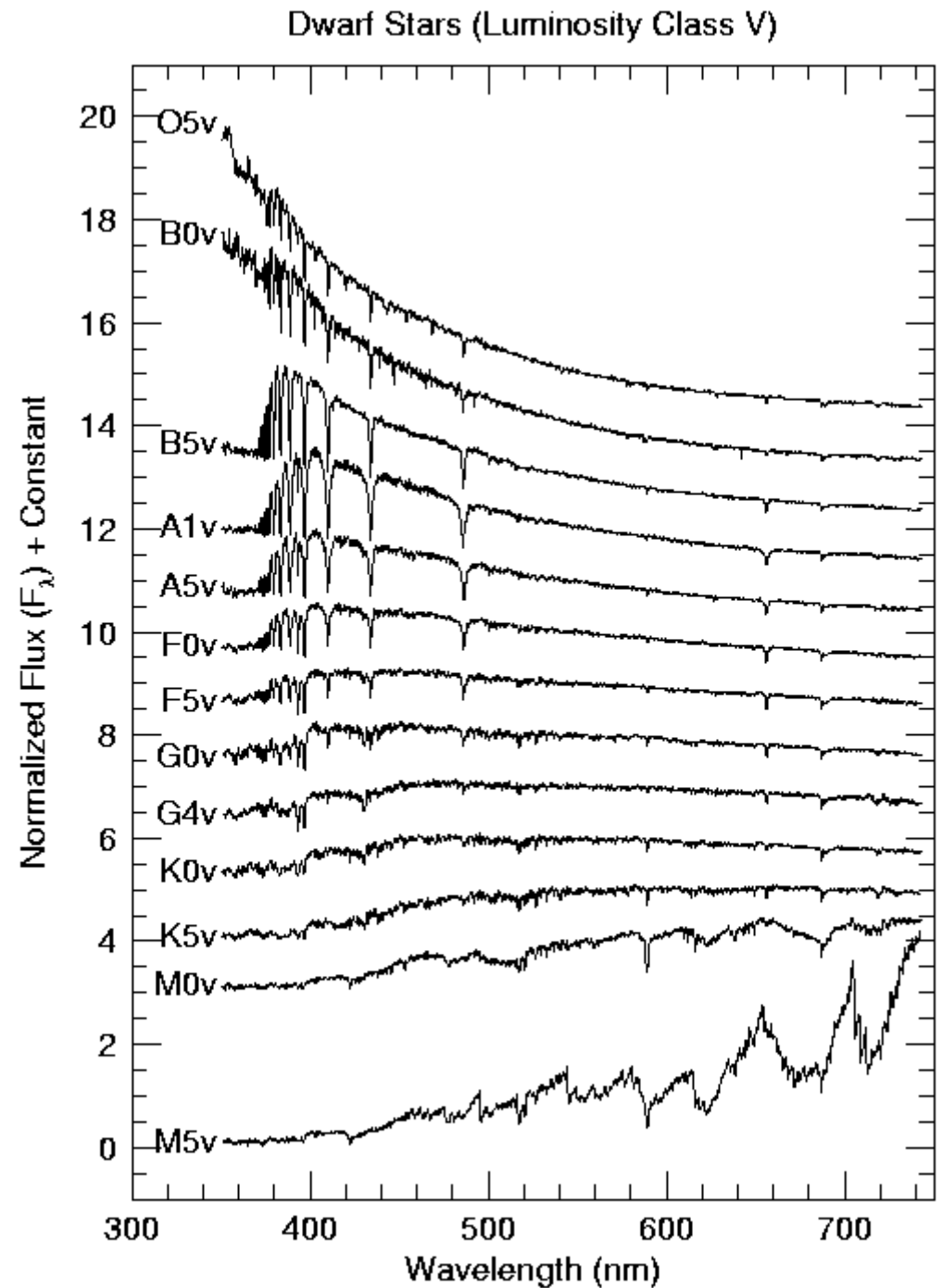
# Types spectraux

- Chaque type spectral est subdivisé en 10 sous-types:
  - A0V, A1V, A2V..., A9V
- Les raies proéminentes dépendent du type spectral



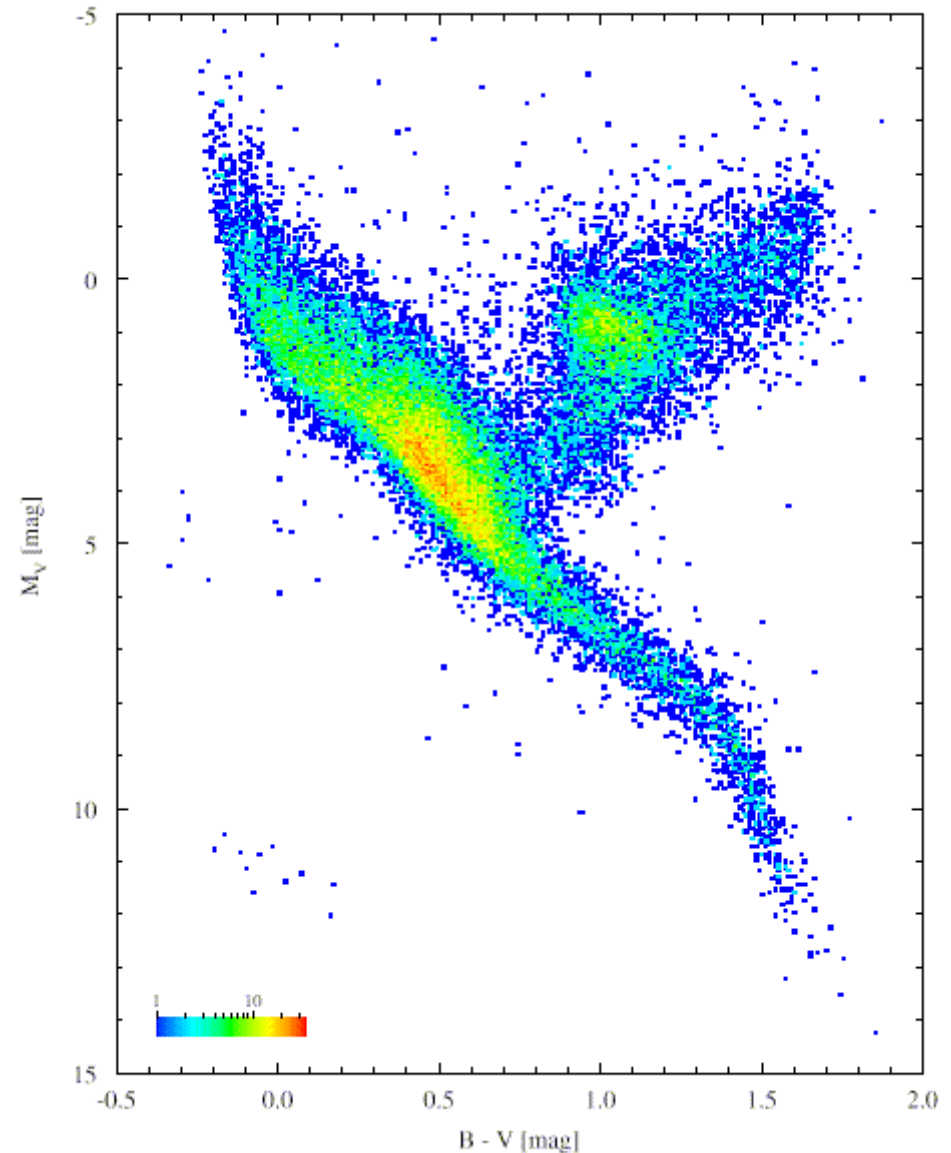
Cross-referencing different line strengths narrows the possible temperature range. A given strength for the Hydrogen line could mean two possible temperatures (hot or warm). If Helium line is present, then the choice is the hot temperature. If the ionized Calcium line is present (and Helium not present), then the choice is the warm temperature.

- Comparaison des spectres-type pour des étoiles naines



# Diagramme HR

- Pour le voisinage solaire (HIPPARCOS):  
étoiles de tous âges pris au hasard à un moment donné de leur évolution



# Dans un amas globulaire

- Ensemble d'étoiles à peu près du même âge, de toutes masses

