

# Evolution des étoiles... ... le temps qu'il faut

Isabelle VAUGLIN

Observatoire de Lyon

Formation des étoiles:

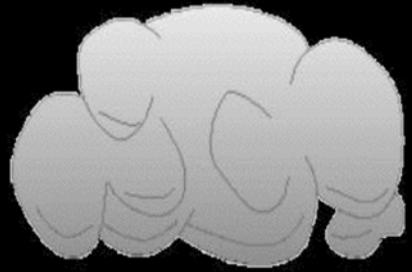
Naissance dans une pouponnière

## Nuages moléculaires

- $M \sim 10^4$  à  $10^5 M_{\odot}$  (10 000 à 100 000  $M_{\odot}$ )
  - $R \sim 100$  pc (3 090 000 000 000 000 000 m)
  - $T \sim 10$  K (- 263 °C)
- ⇒ Les atomes sont combinés en molécules (H<sub>2</sub>, CO, ...)
- Équilibre entre gravité et pression du gaz
  - Si perturbation (supernova)
    - ⇒ Équilibre rompu ⇒ **effondrement rapide : quelques milliers d'années**



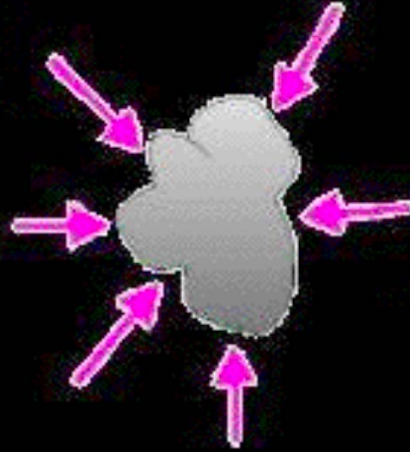
# Effondrement



Le nuage moléculaire  
s'effondre

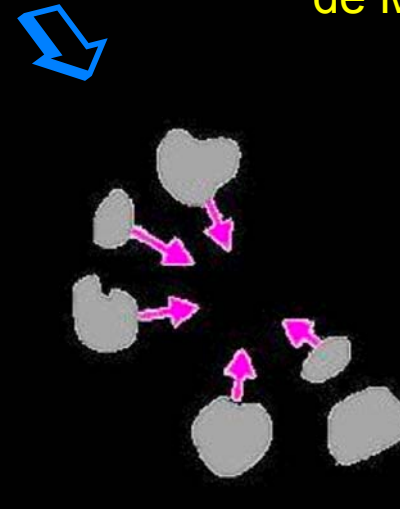


**Contraction et  
échauffement de  
chaque grumeau  
⇒ nébuleuse protostellaire**



**Instabilités:**

Fragmentation en de  
nombreux grumeaux  
de  $M \sim 1$  à  $100 M_{\odot}$



# Mécanisme de formation:

Contraction d'un nuage de gaz

Proto-étoile + nébuleuse

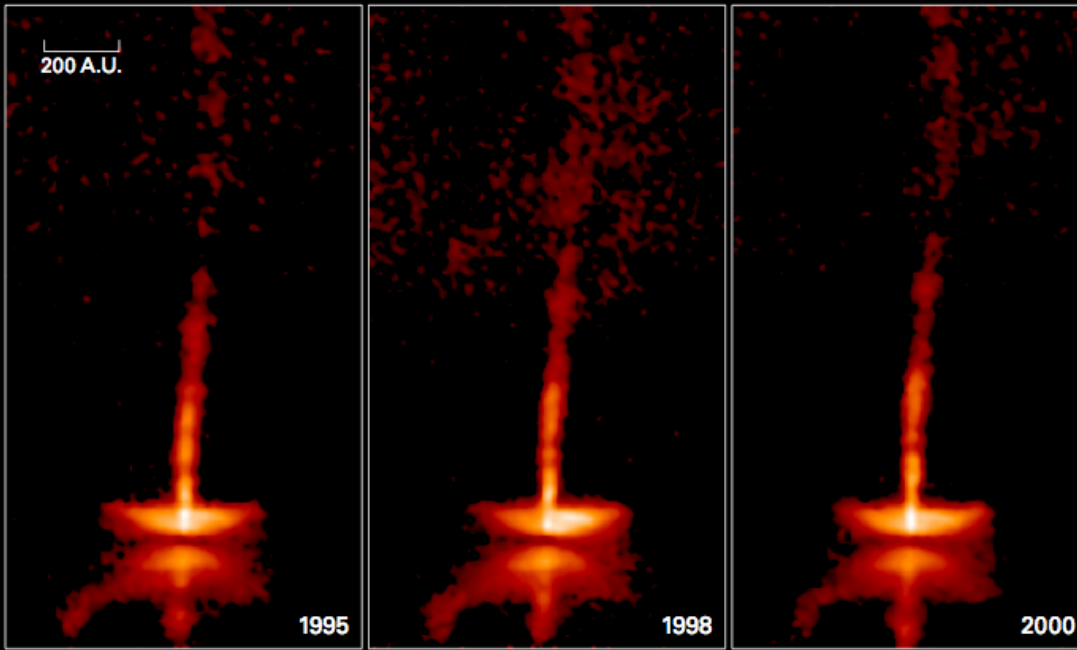
$$R = 50 R_{\odot}$$

$$T_{\text{surf}} = 3500\text{K}$$

$$T_{\text{coeur}} = 0.15 \cdot 10^6 \text{ K}$$

Rotation ↑ aplatissement ↑ disque

Condensation + planétésimaux



**The Dynamic HH 30 Disk and Jet**  
Hubble Space Telescope • WFPC2

NASA and A. Watson (Instituto de Astronomía, UNAM, Mexico) • STScI-PRC00-32b

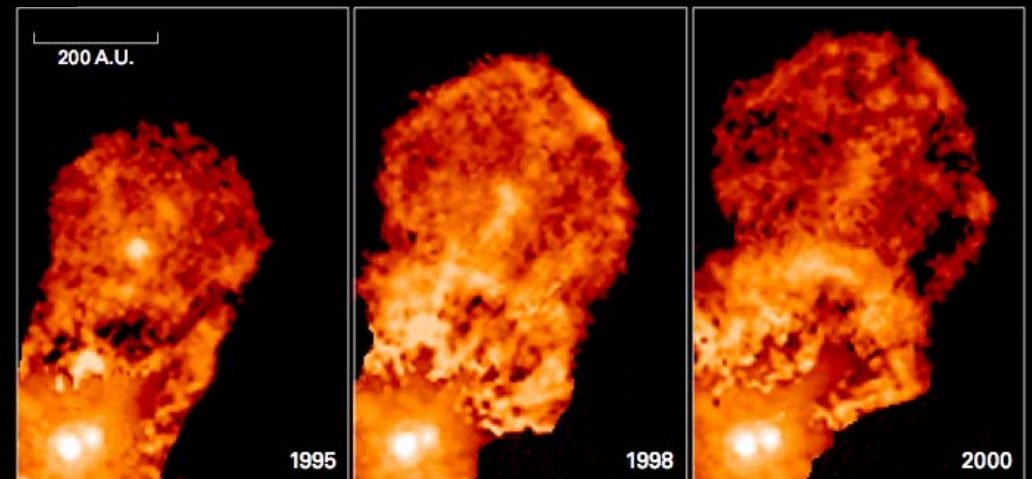
# Étoiles pré-séquence principale: Une jeunesse tumultueuse!

La contraction continue jusqu'au démarrage des réactions thermonucléaires dans le cœur

Etoile T Tauri: activité intense  
disques et jets

Démarrage de la chaîne P-P  
Température du cœur:  $10^7$  K  
Température surface: 4500 K

**Durée: 10 millions d'années**

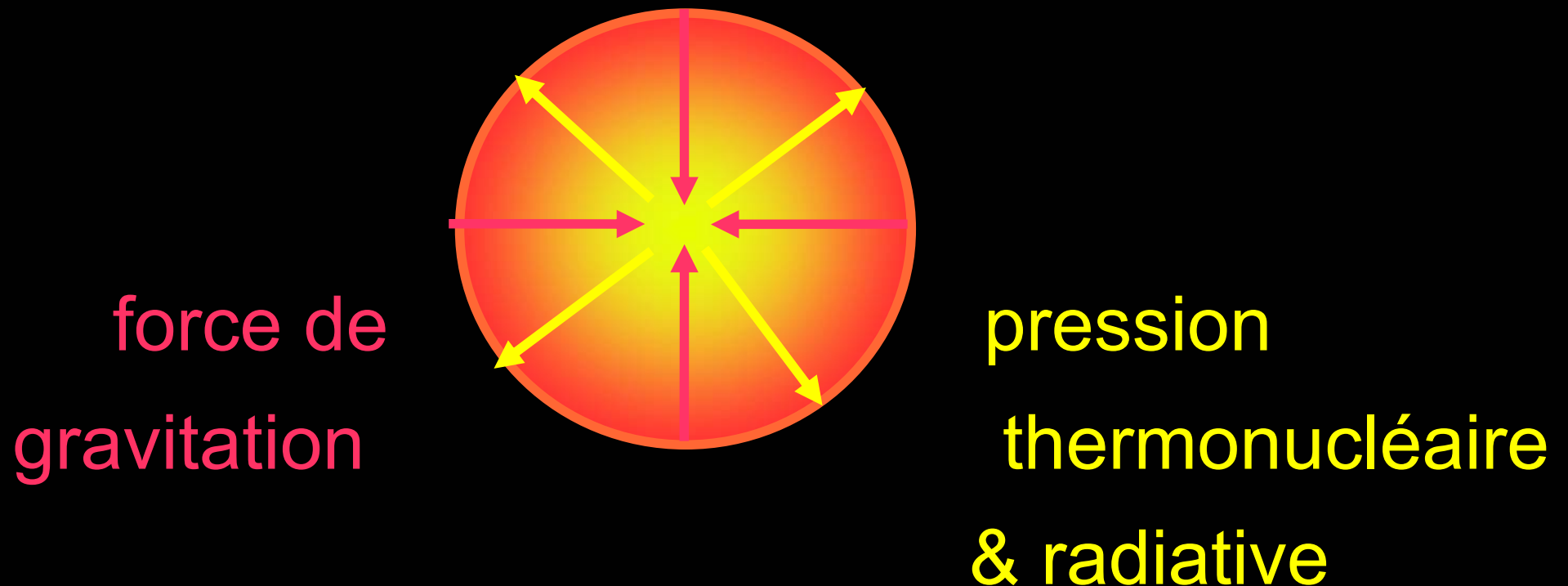


**Hot Gas Bubble Ejected by Binary Star XZ Tauri**  
Hubble Space Telescope • WFPC2

NASA and J. Krist (STScI) • STScI-PRC00-32

## ... qu'est-ce qu'une étoile?

- ⌘ Une boule de gaz
- ⌘ Chaud (de  $T \sim 5000$  K à la surface à  $T > 10 \cdot 10^6$  K au centre)
- ⌘ Sphérique (essentiellement...)
- ⌘ En équilibre sous l'action conjuguée de la *gravité* et de la *pression* du gaz
- ⌘ Rayonnant de l'énergie (émet sa propre lumière grâce à des réactions thermonucléaires)



# la plus people des stars : notre Soleil

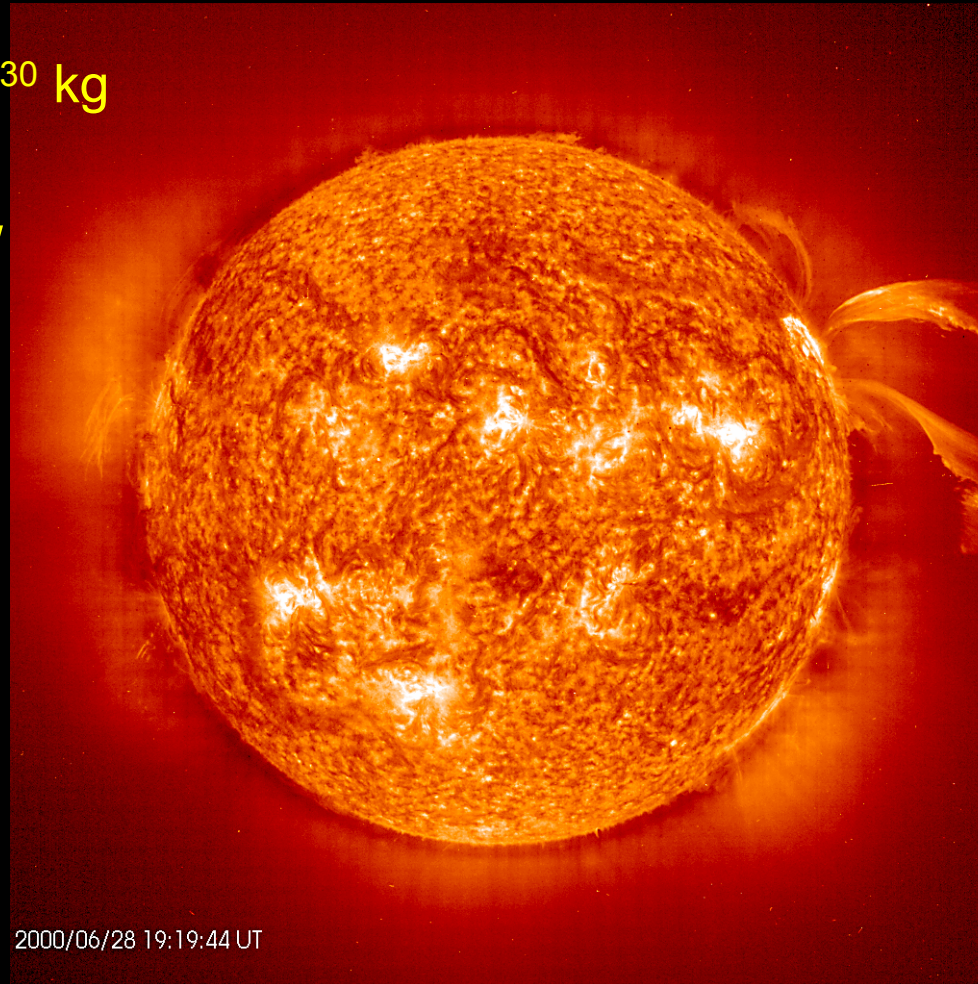
$$1 M_{\odot} = 1,988\ 92 \times 10^{30} \text{ kg}$$

$$1 R_{\odot} = 695\ 990 \text{ km}$$

$$1 L_{\odot} = 3,826 \times 10^{26} \text{ W}$$

$$T_{\text{eff},\odot} = 5\ 780 \text{ K}$$

$$\text{Age} \cong 4.5 \cdot 10^9 \text{ ans}$$



H : 90%

He : 10%

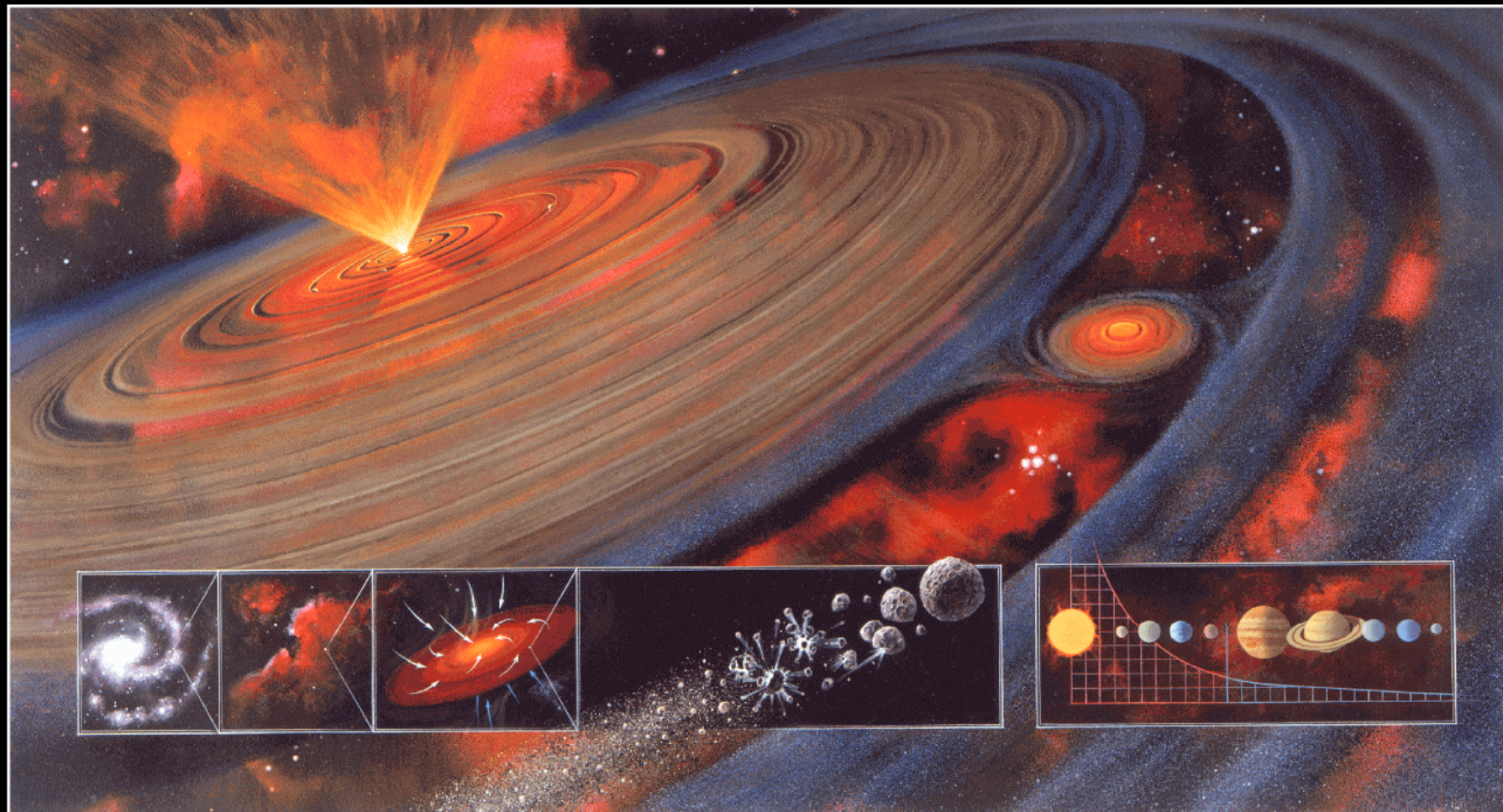
"Métaux" : traces

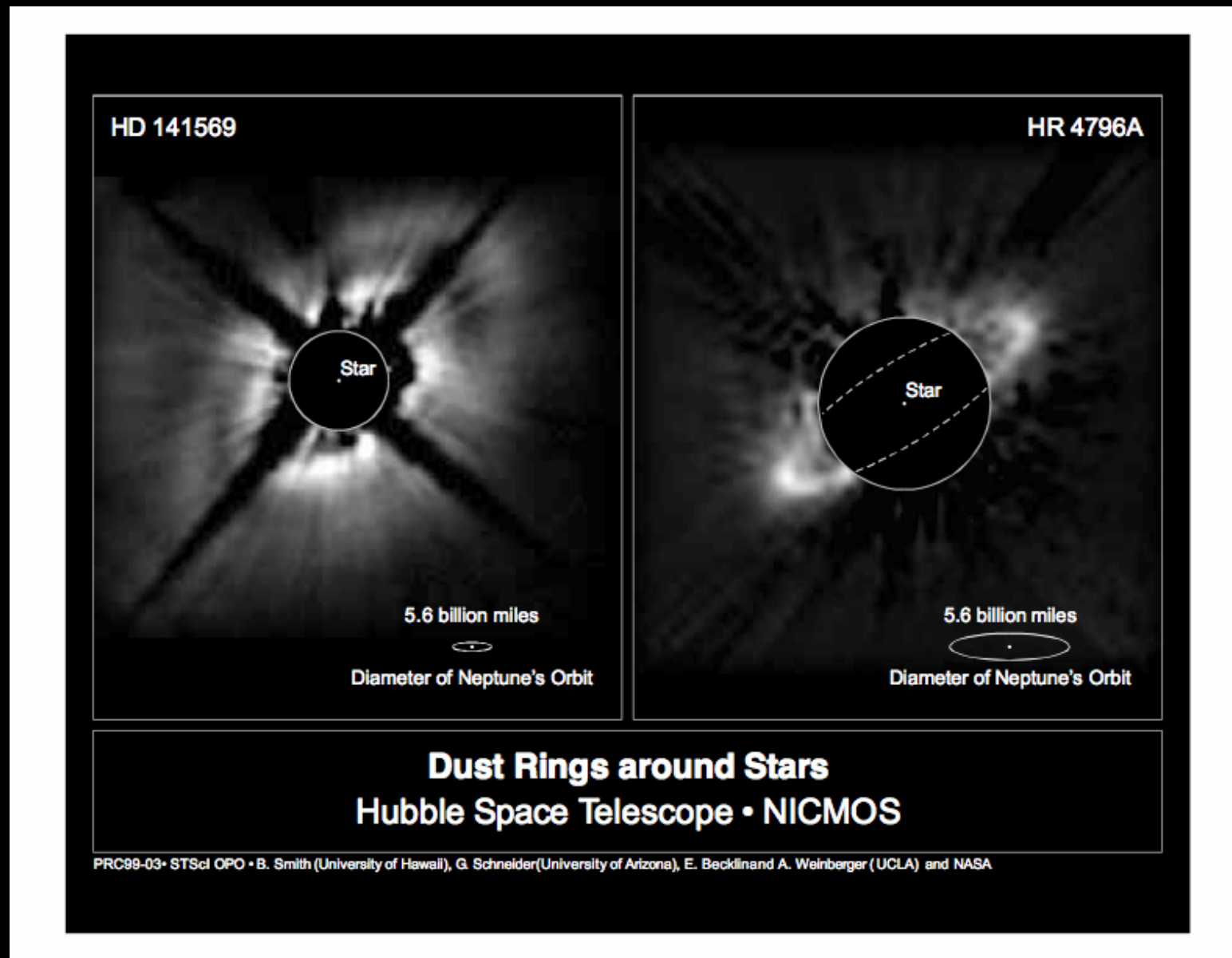
©SOHO

***Perte de masse: 4 millions de tonnes par seconde***



dans de nombreux cas:  
Formation simultanée d'un  
système planétaire





Autour des proto-étoiles: disques de débris

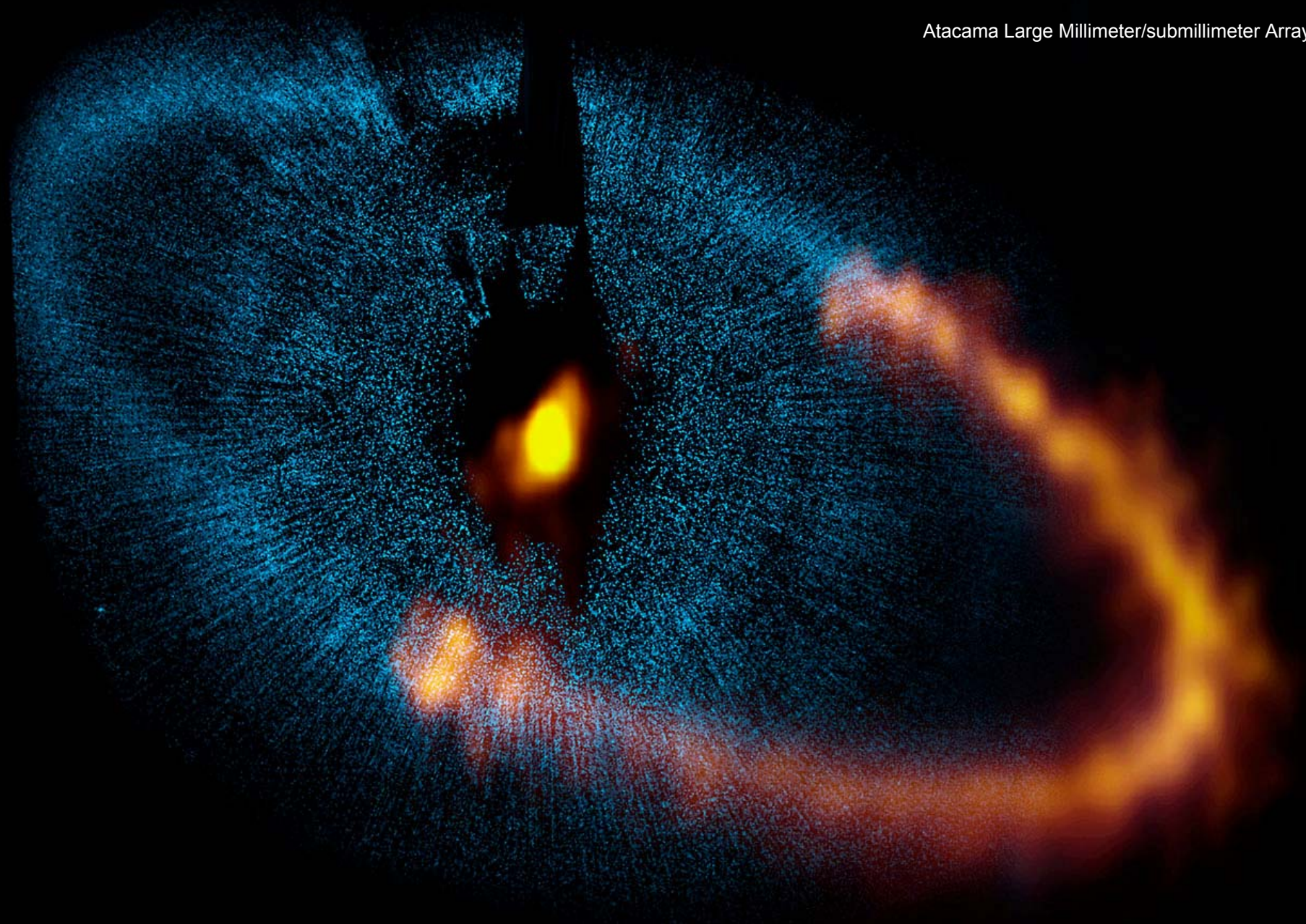


HST WFPC2 - Orion Nebulae

Disques proto-planétaires

Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA)

Disque autour de l'étoile Fomalhaut (visible + radio)



# couleur des étoiles



©Matthew Spinelli



© Royal Observatory, Edinburgh / Anglo-Australian Observatory



©Observatory Austria

Paramètre fondamental: **la Masse**

## Durée de vie :

$10^{13}$ ans

$10^{11}$ ans

$10^{10}$ ans

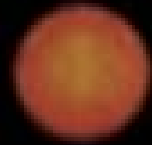
$10^7$ ans

$0.01 M_{\odot}$

$0.1 M_{\odot}$

$0.5 - 3 M_{\odot}$

$> 8 M_{\odot}$



naine  
brune

naine  
rouge

étoile de  
type solaire

géante  
bleue

600 K

2600 K

6000 K

35000 K

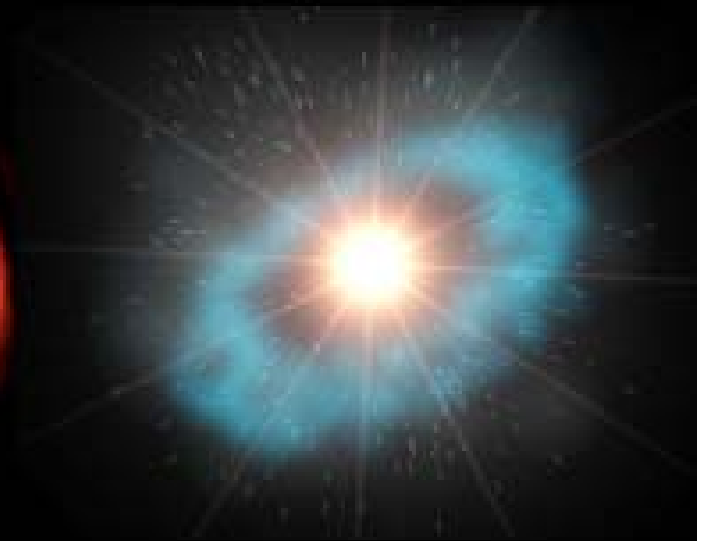
Fin de vie :

$10^{13}$  ans

$10^{11}$  ans

$10^{10}$  ans

$10^7$  ans



naine  
brune

naine  
rouge

géante  
rouge

supernova  
de type II

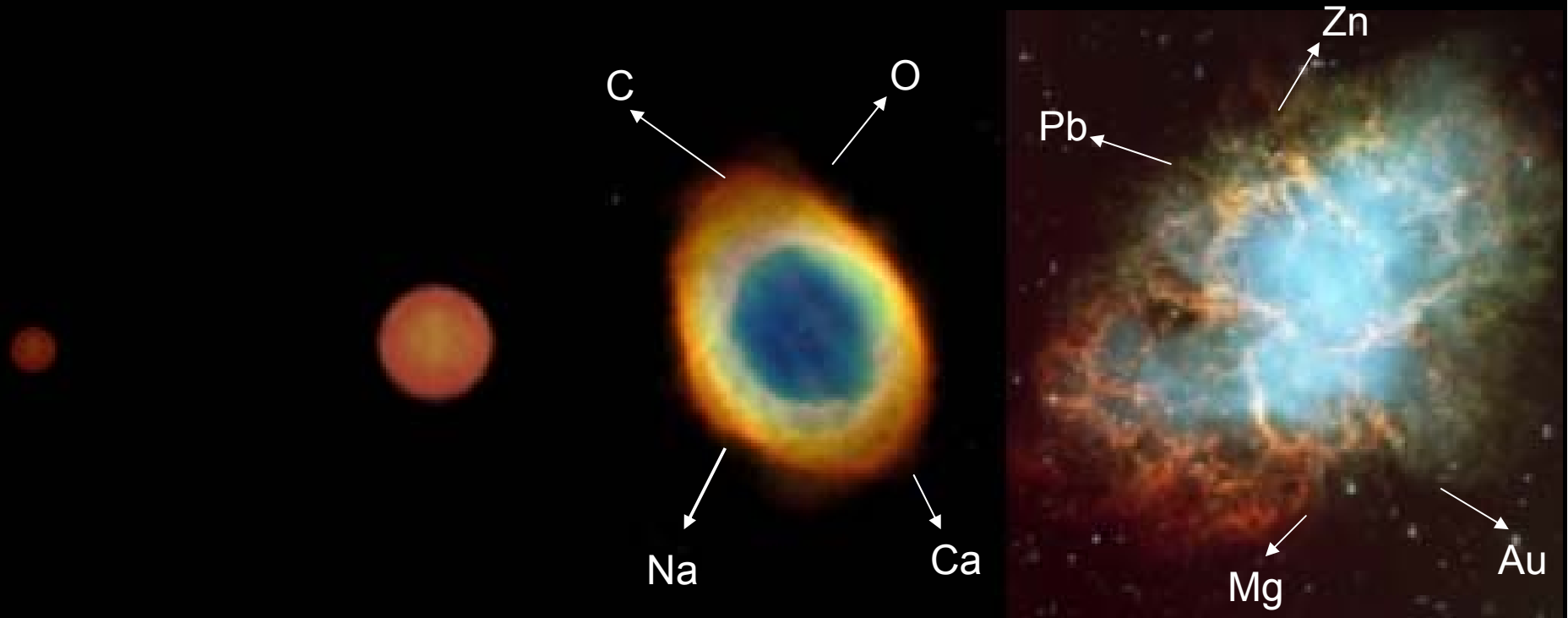
$0.01 M_{\odot}$

$0.1 M_{\odot}$

$0.5 - 3 M_{\odot}$

$> 8 M_{\odot}$

# dispersion des éléments chimiques



naine  
brune

naine  
rouge

nébuleuse  
planétaire

restes de  
supernova

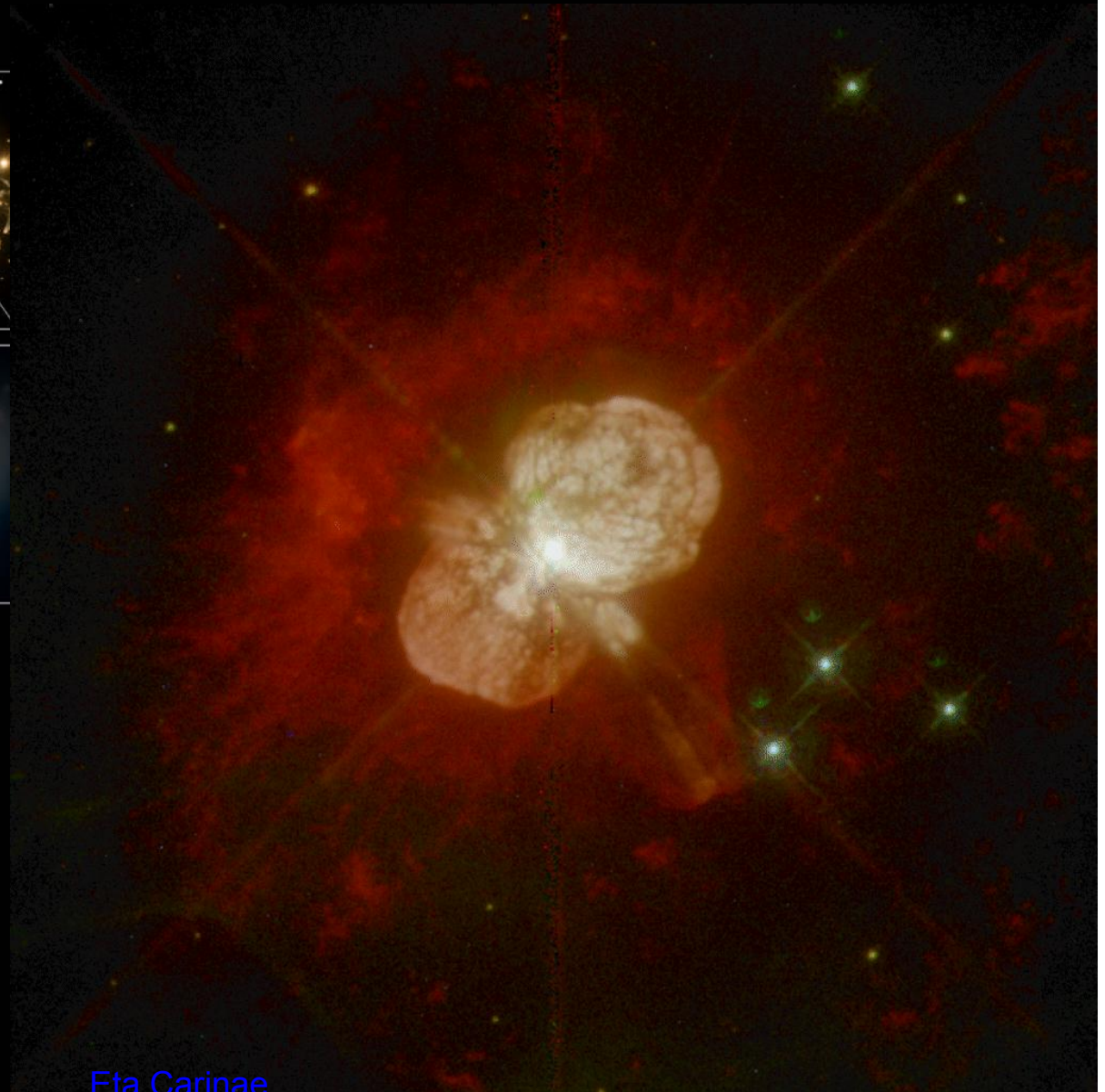


# Les soubresauts d'une étoile massive



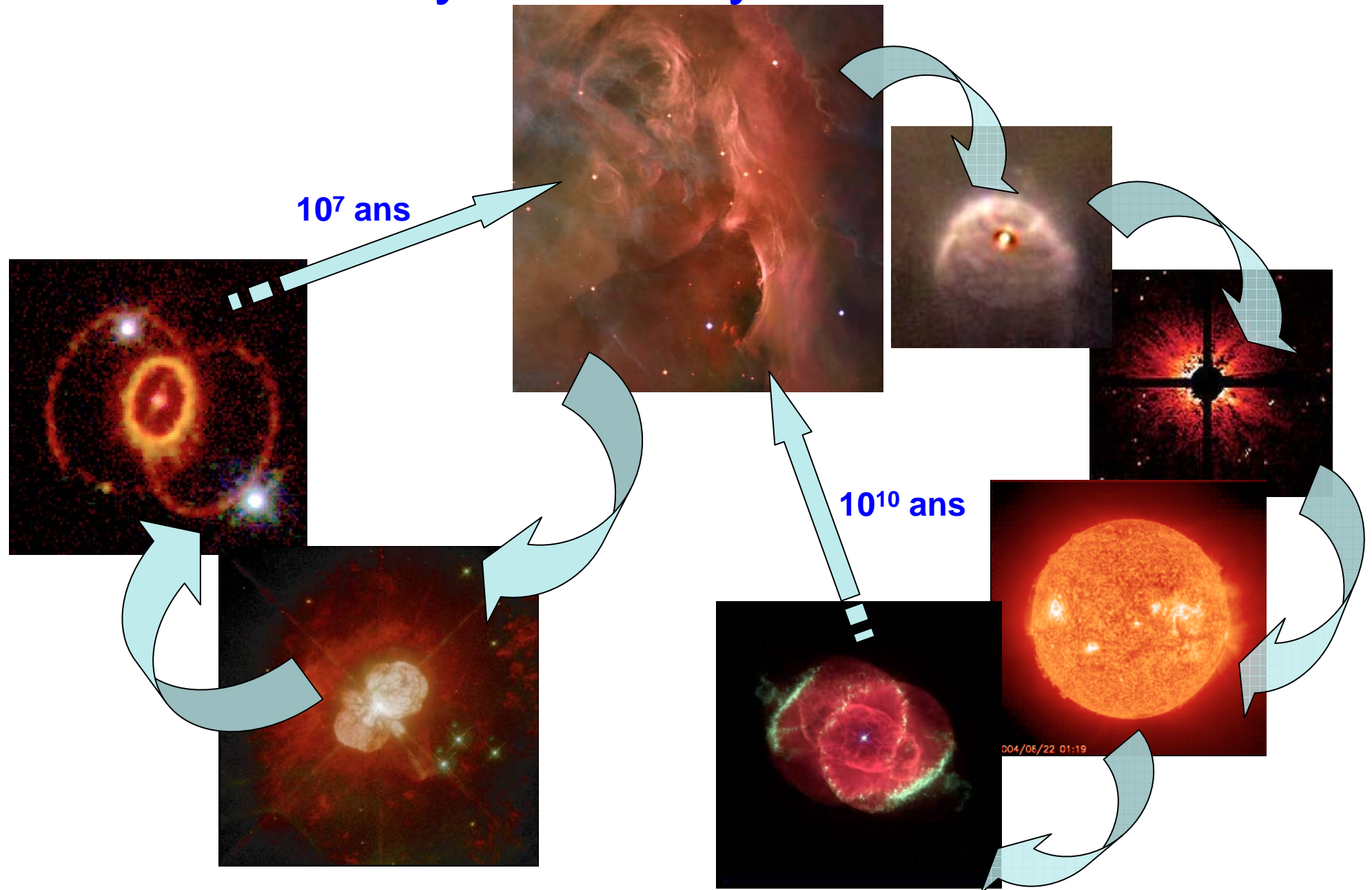
Cat's Eye Nebula

Enrichissement du milieu interstellaire



Eta Carinae

# La nucléosynthèse: cycle des éléments





Une mort grandiose !

Paramètre fondamental: *la masse*

Paramètres de l'évolution:

Température, rayon et luminosité



# Classification spectrale

a) Types spectraux

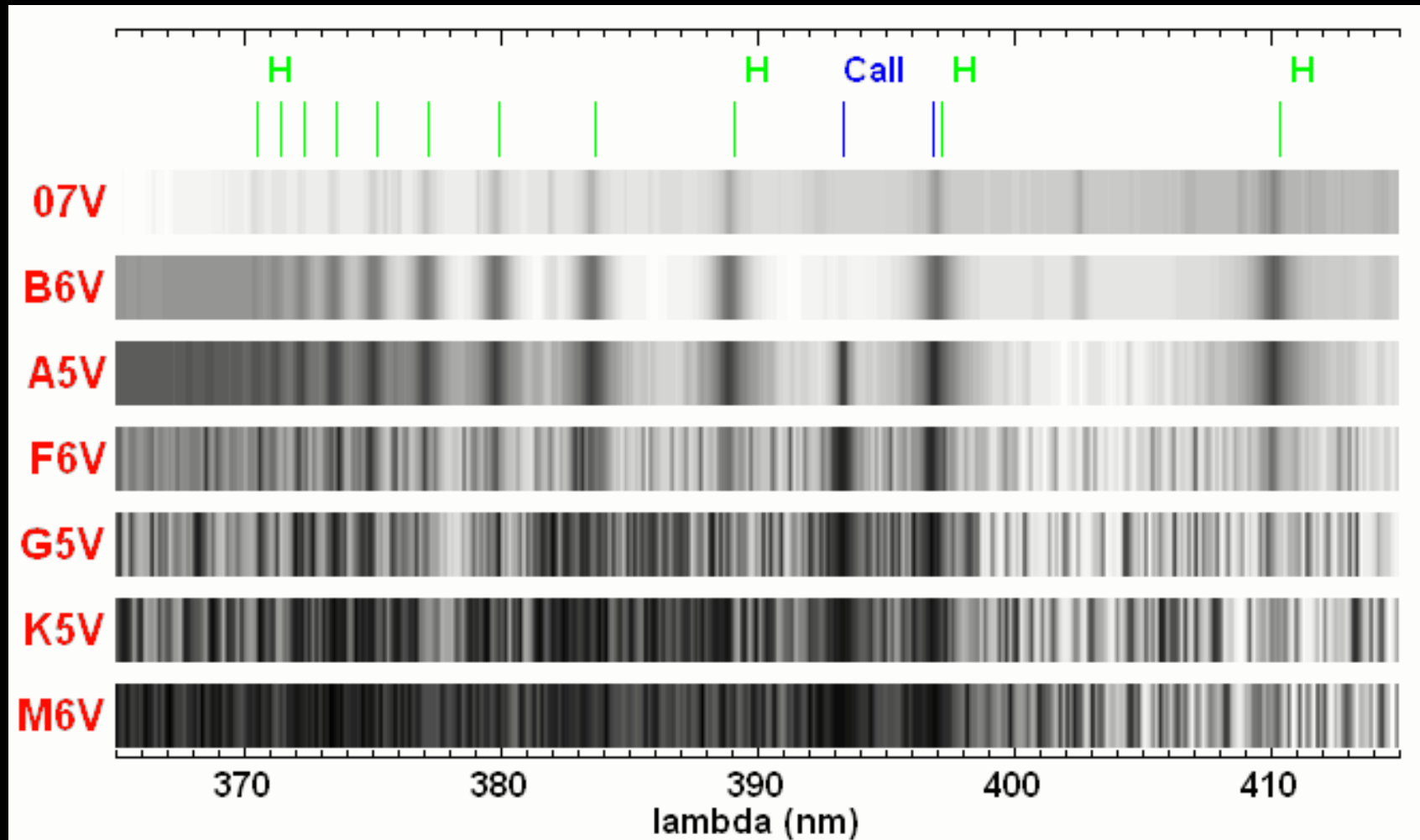
b) Classes de luminosité

c) Diagramme HR



# *Spectres des étoiles*

↓↓↓ *Types Spectraux*



# Les Types Spectraux sont basés sur

- Couleur de l'étoile
- Spectroscopie plus fine (intensité des raies)

Et sont composés de

- Une lettre
  
- Un chiffre de 0 à 9 dans le sens des Températures décroissantes

# Classes de luminosité

Pour tenir compte de l'aspect des mêmes raies, différent selon les étoiles

o Largeurs des raies  $\Rightarrow$  gravité  $\Rightarrow R$

o Sept classes:

I. Supergéantes

II. Géantes brillantes

III. Géantes

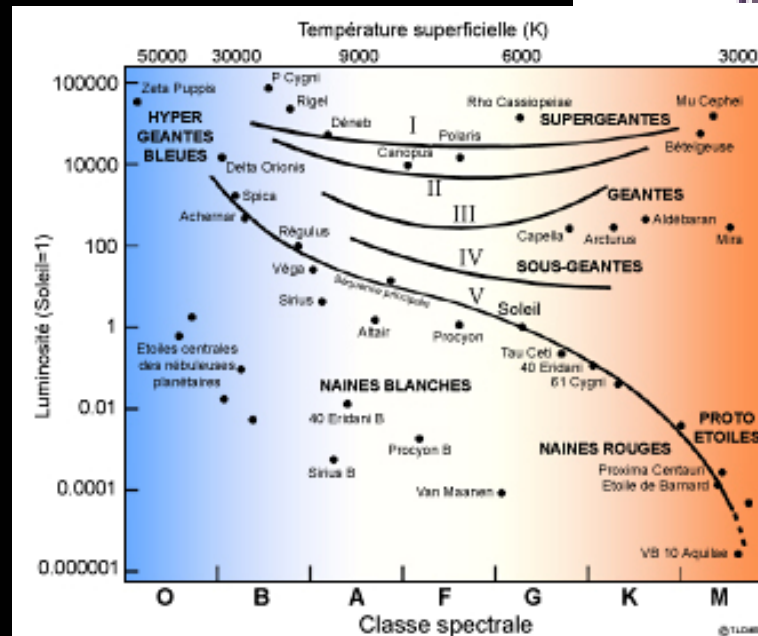
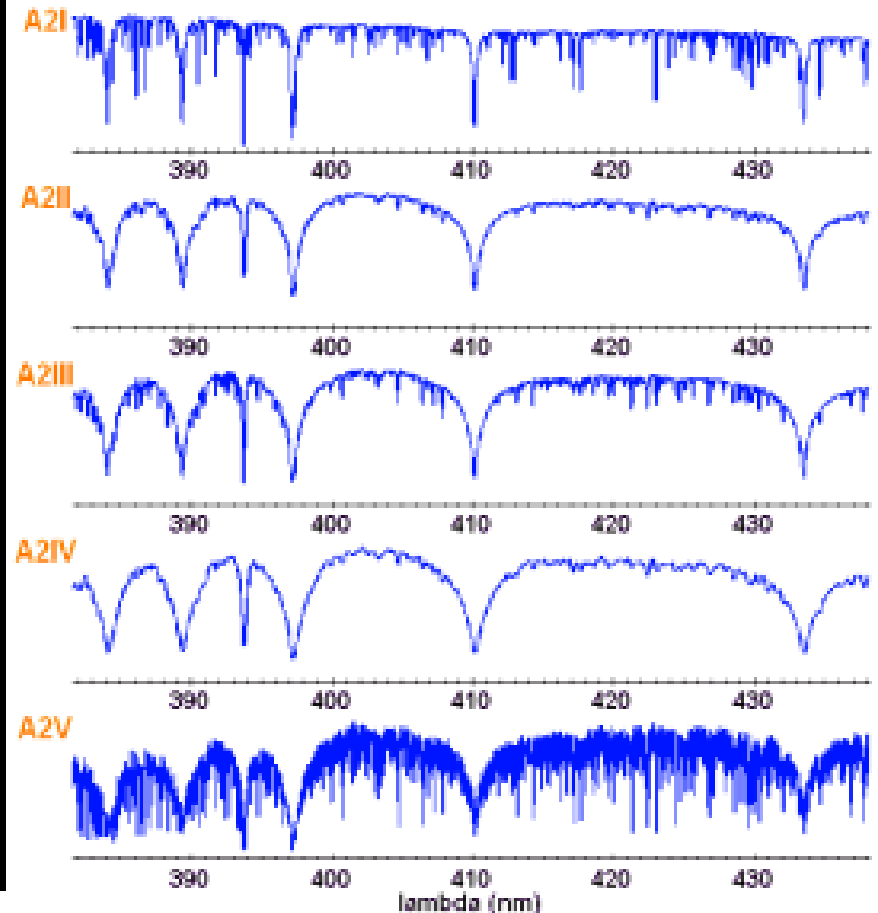
IV. Sous-géantes

V. Naines

VI. Sous-Naines

VII. Naines blanches

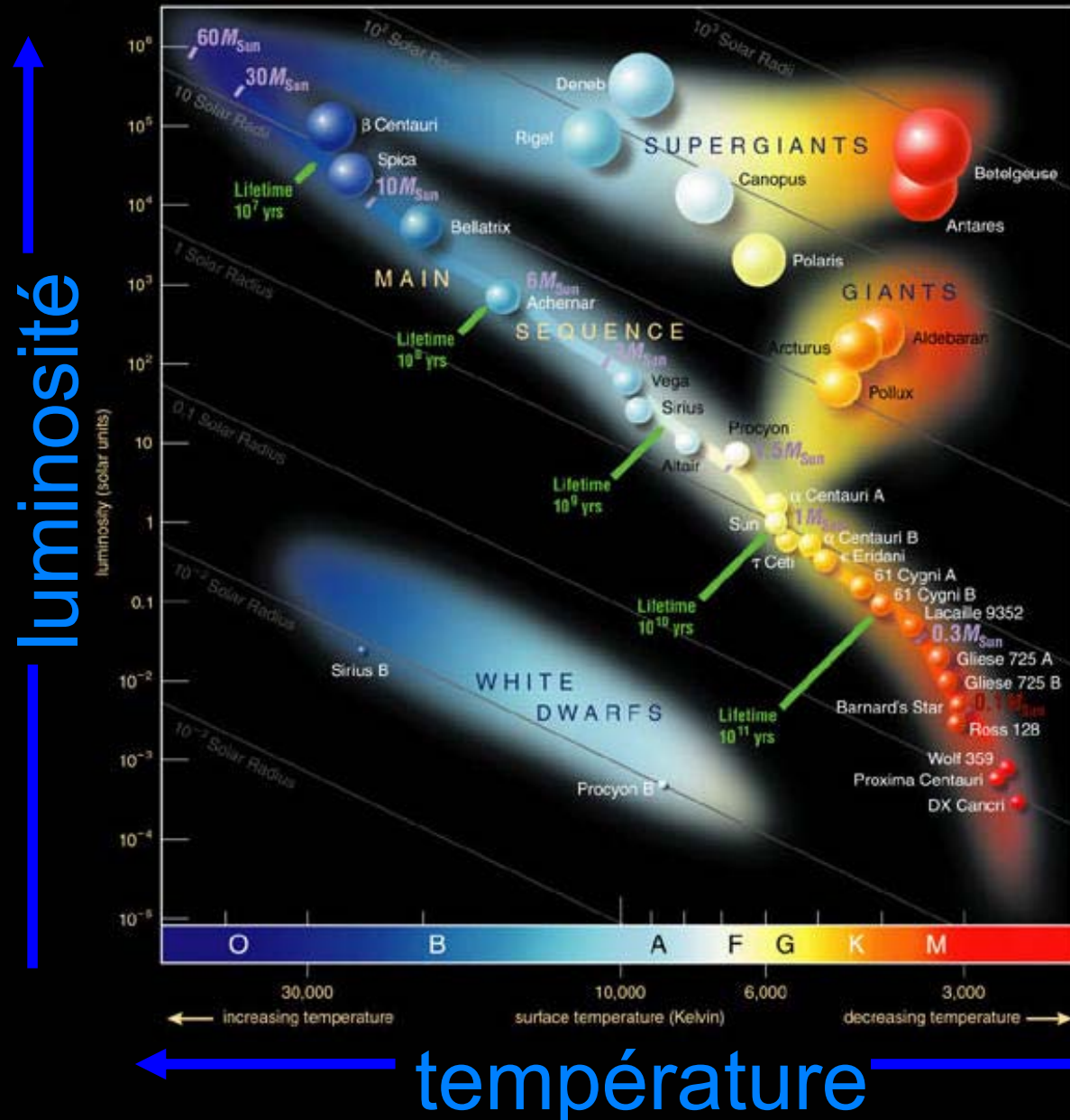
Soleil : G2V





# Diagramme Hertzsprung-Russell

## classification des étoiles



# Rayons et masses dans le diagramme HR

Les étoiles sont assimilables à des corps noirs:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

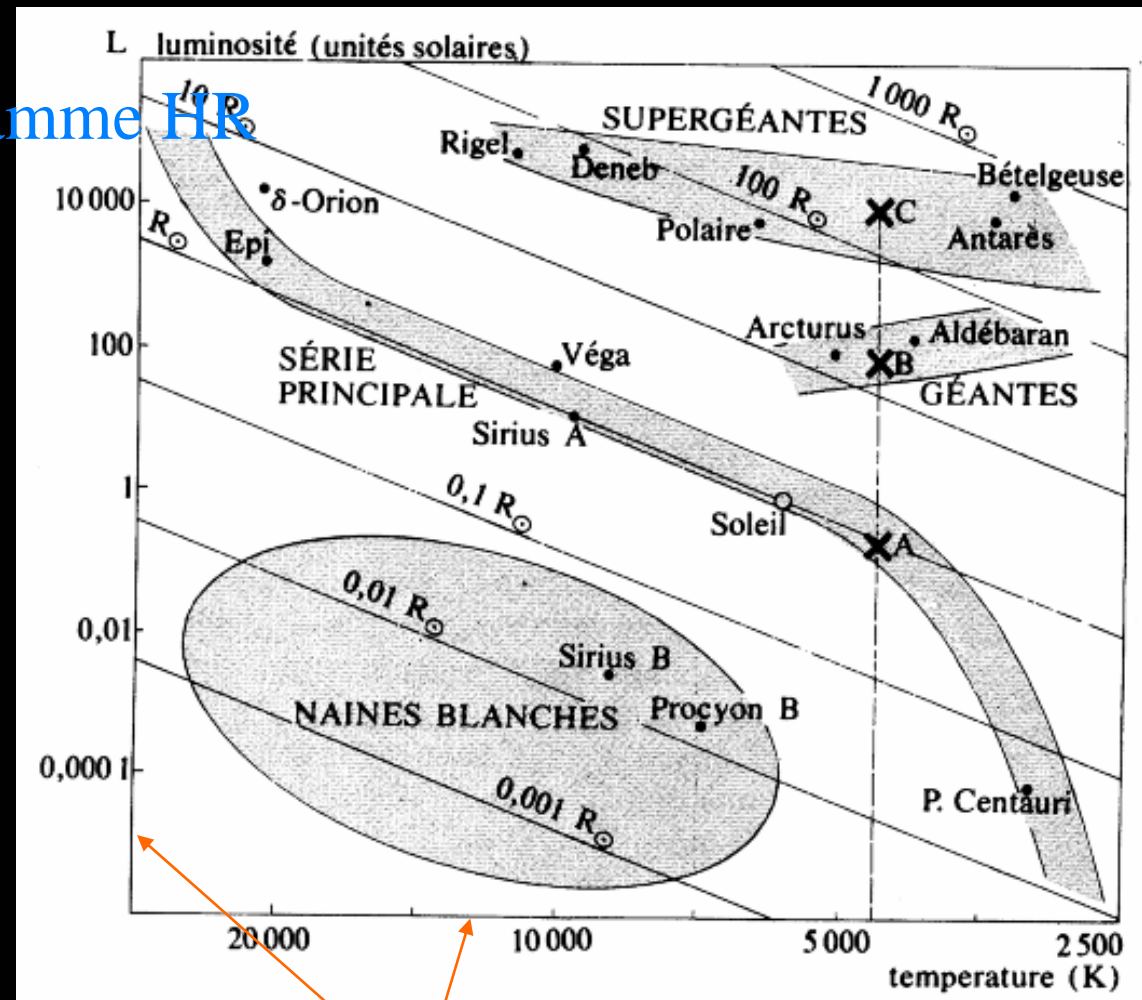
$T$ : Température effective

Pour deux étoiles :

$$M_1 - M_2 = -5 \log \left( \frac{R_1}{R_2} \right) - 10.0 \log \left( \frac{T_1}{T_2} \right)$$

$$M = -10 \log T - 5 \log R + C^{te}$$

$$y = a x + b$$



Echelles logarithmiques

Relation linéaire entre  $M$  et  $\log T$  pour un rayon  $R$  constant.

Relation linéaire entre  $M$  et  $\log R$  pour une température constante.

Echelle des rayons de 1 à  $10^6$

# Diagramme HR

Diagramme HR à partir des 16 631 étoiles du catalogue Hipparcos (distances des étoiles mesurées)

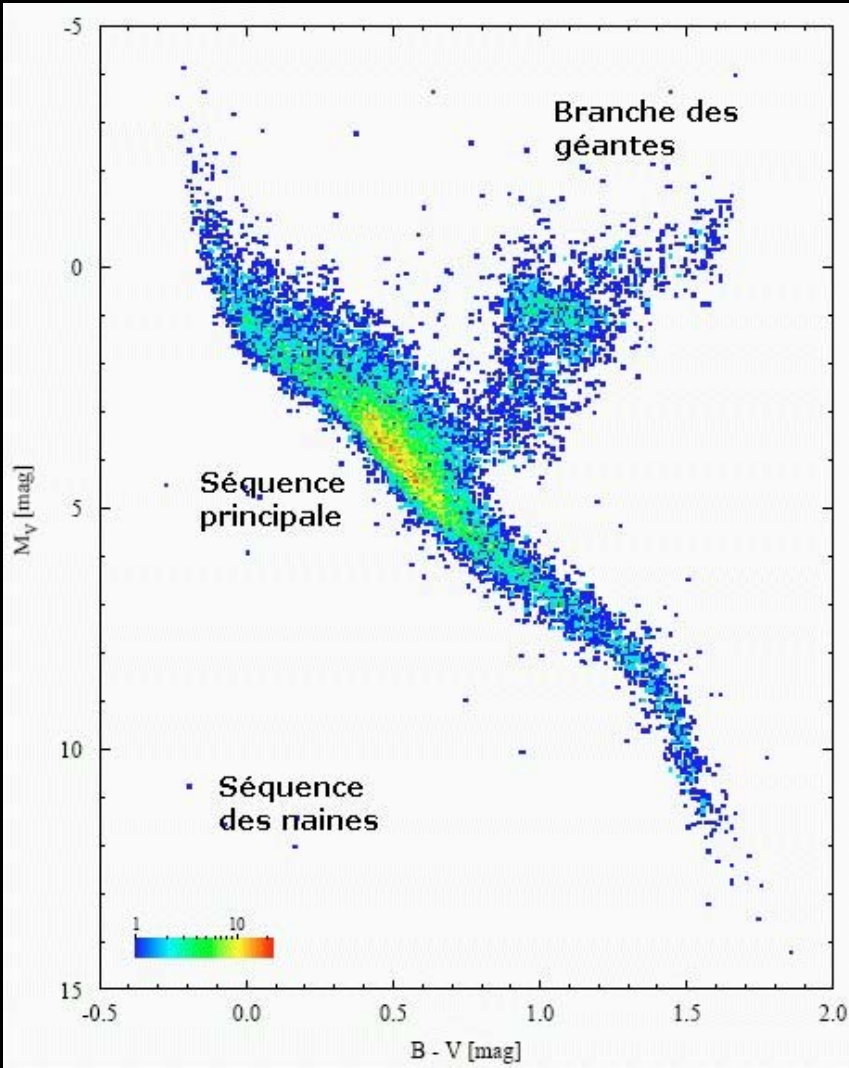
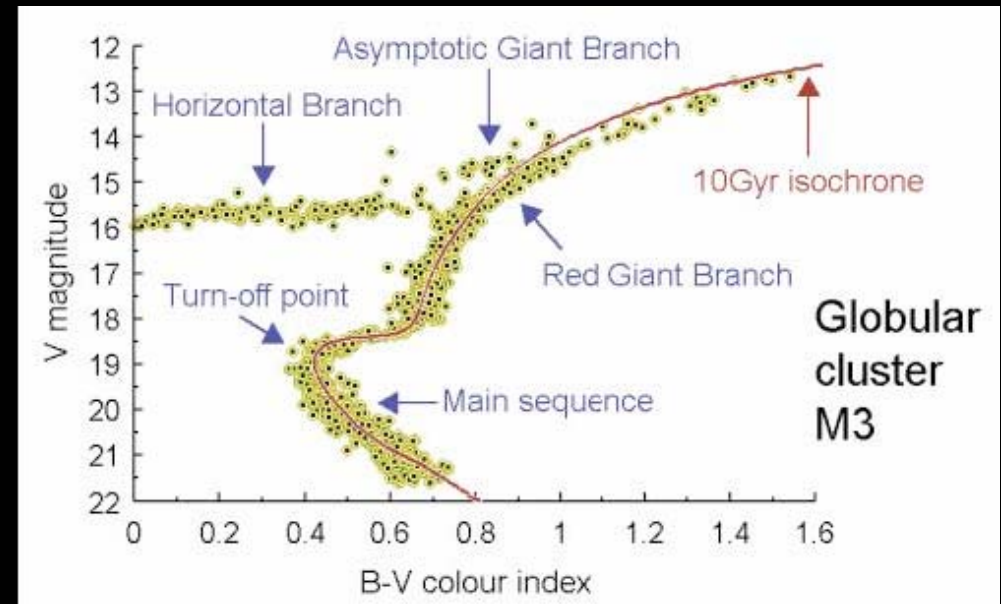


Diagramme HR d'un amas globulaire:  
Toutes les étoiles ont le même âge



# Résumé des Phases d'évolution des étoiles:

## Etoile de type solaire:

Pré-séquence principale : 10 millions  
d'années  
Séquence principale : 10 milliards  
d'années  
Départ de la SP : 1 milliard d'années  
Géante rouge : 100 millions  
d'années  
Combustion de l'Hélium : 2 milliards  
d'années  
Nébuleuse planétaire : 25 000 ans  
Naine blanche : Refroidissement infini

## Etoiles massives:

Pré-séquence principale : 10 millions  
d'années  
Séquence principale : 10-100  
millions d'années  
Combustion en pelures d'oignons:  
He : 1 million d'années  
C : 300 ans  
O : 2-3 ans  
Si : 2 jours  
Pas de stade Géante rouge  
Catastrophe du fer  
Explosion en supernova  
Etoile à neutrons ou trou noir

# Résumé des Phases d'évolution des étoiles:

## Etoile de type solaire:

Pré-séquence principale : 10 millions  
d'années  
Séquence principale : 10 milliards  
d'années  
Départ de la SP : 1 milliard d'années  
Géante rouge : 100 millions  
d'années  
Combustion de l'Hélium : 2 milliards  
d'années  
Nébuleuse planétaire : 25 000 ans  
Naine blanche : Refroidissement infini

## Etoiles massives:

Pré-séquence principale : 10 millions  
d'années  
Séquence principale : 10-100  
millions d'années  
Combustion en pelures d'oignons:  
He : 1 million d'années  
C : 300 ans  
O : 2-3 ans  
Si : 2 jours  
Pas de stade Géante rouge  
Catastrophe du fer  
Explosion en supernova  
Etoile à neutrons ou trou noir

# Résumé: Influence de la masse

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

Selon la masse  $M$  des objets formés:

- $M > \sim 8 M_{\odot}$  : vie courte, nombreux cycles de réactions nucléaires, supernova, fort enrichissement du milieu interstellaire
- $M > 1.2 M_{\odot}$  : cycle CNO
- $0.4 M_{\odot} < M < 1.2 M_{\odot}$  : type solaire, combustion H- $\rightarrow$ He par chaîne P-P et He via triple-alpha, nébuleuse planétaire, enrichissement du milieu interstellaire modéré
- $0.085 M_{\odot} < M < 0.4 M_{\odot}$  : vie longue, pas de triple-alpha, ni combustion He
- $0.01 M_{\odot} < M < 0.085 M_{\odot}$  : naines brunes, pas de chaîne P-P, très peu lumineuses (visibles en infrarouge)
- $M < 0.01 M_{\odot}$  : planètes gazeuses – Jupiter ( $0.001 M_{\odot}$ )