

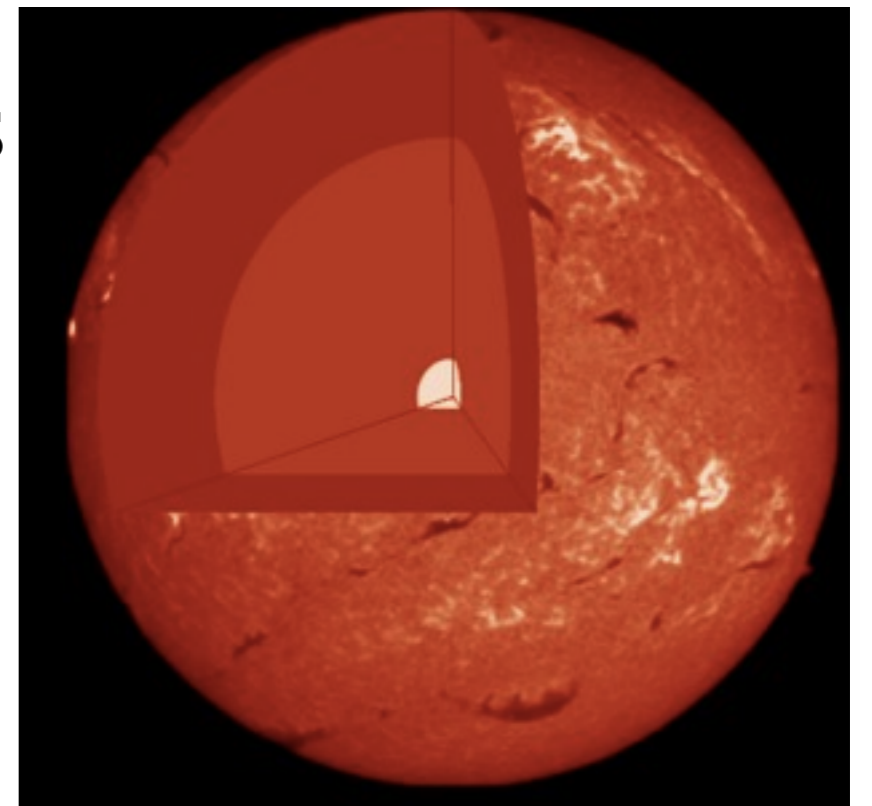
Les étoiles et leur évolution (la suite!)

C. Bot, formation pour les documentalistes, Strasbourg
le 10/09/2013

L'intérieur des étoiles

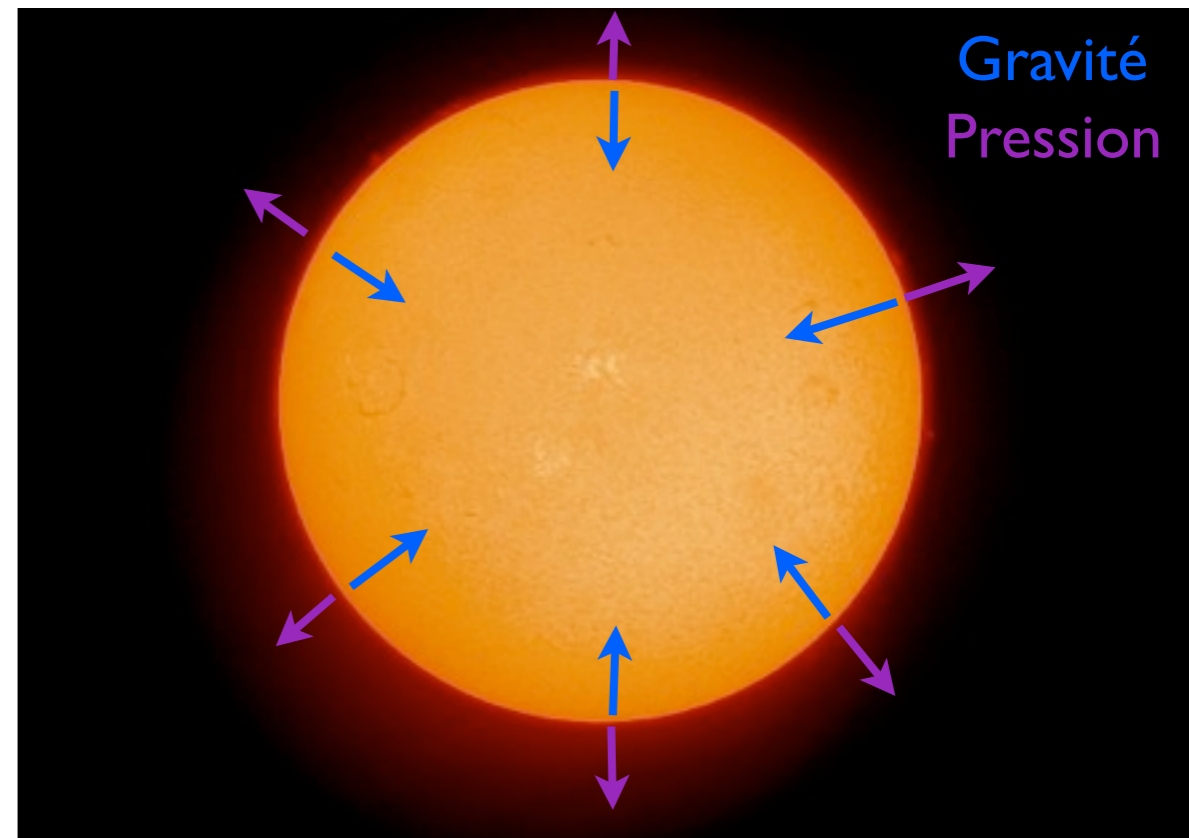
L'intérieur des étoiles

- Non accessible aux observations
 - sauf pour les neutrinos du soleil ou SNI 1987A
- Pour déduire la structure interne des étoiles il faut des modèles
 - cohérents avec les lois de la physique
 - en accord avec les observations de la surface



Pression contre gravité

- Les étoiles évoluent car elles perdent de l'énergie et la source d'énergie n'est pas infinie
- l'évolution stellaire est une bataille permanente contre la gravité.
- **équilibre hydrostatique**
Pour qu'une étoile puisse être statique, la pression doit être + grande à l'intérieur de l'étoile

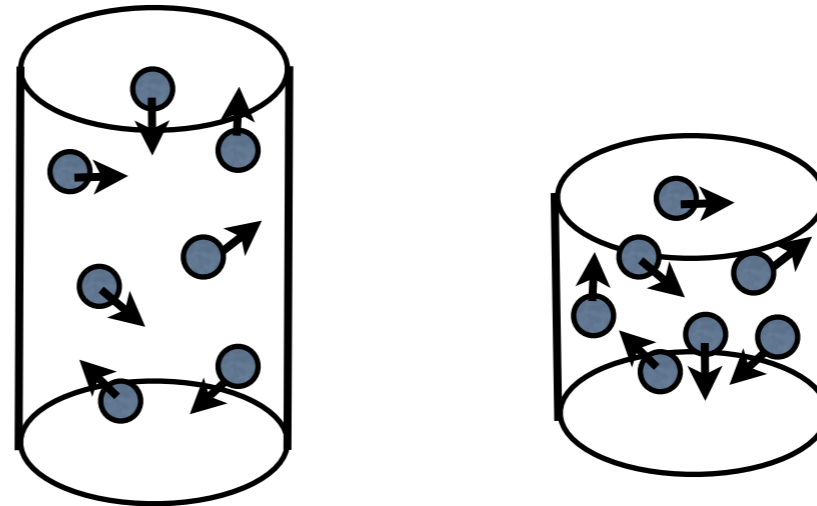
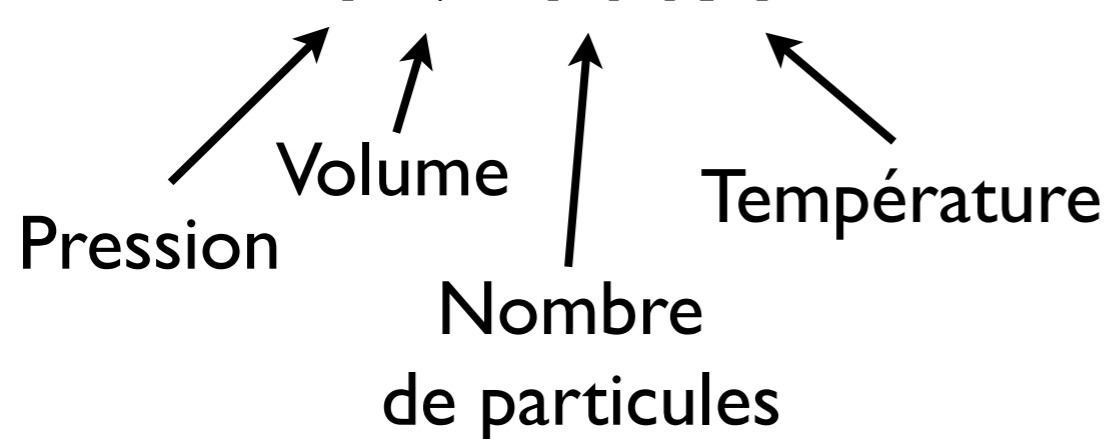


- équation de conservation de la masse:

- $dM/dr = 4\pi r^2 \rho$

- équation d'état d'un gaz parfait:

- $PV = N k T$



- dans certaines étoiles, on ne peut pas parler de gaz parfait (étoiles à neutrons, naines brunes,...)

Source d'énergie des étoiles

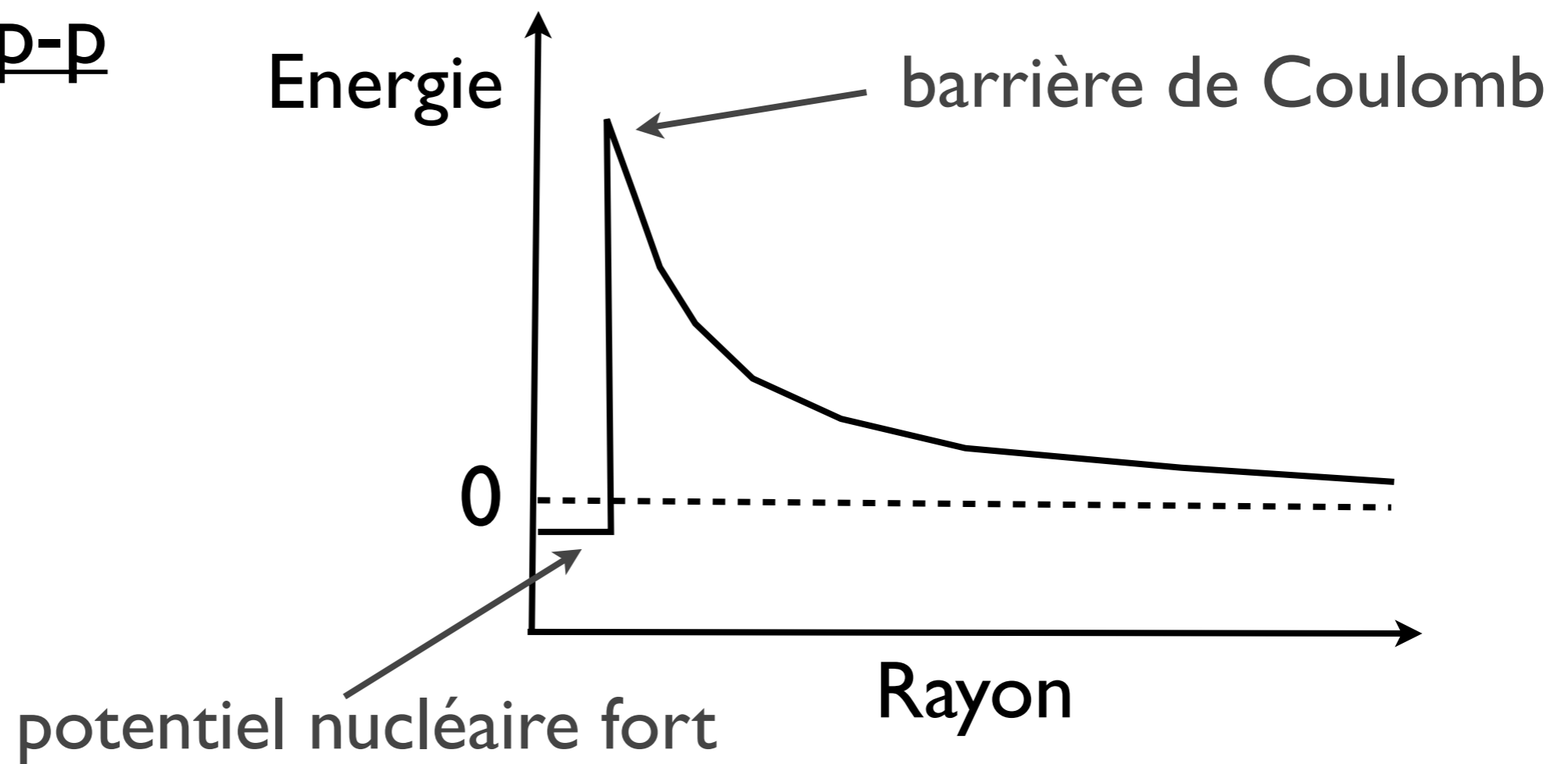
- potentiel gravitationnel?
- si on fait le calcul pour notre Soleil, on trouve un temps de vie de 10^7 ans (roches lunaires estimées à 10^{10} ans)
- Réaction nucléaires
- changent un type de noyau en un autre

- atome d'H: 1 proton + 1 electron
- $m_H < m_{p^+} + m_{e^-}$!!
 - La différence est de 13.6eV
 - C'est l'énergie de liaison de l'atome (masse et énergie sont équivalents: $E=mc^2$)
- Quand on combine des nucléons (p^+ ou e^-) pour former un atome, on crée de l'énergie et on perd de la masse
- $4 H \rightarrow He +$ particule de faible masse
- Ce sont des réactions de fusion nucléaire
- $4H \rightarrow He$ se fait par des chaines de réactions

Source d'énergie des étoiles

- potentiel gravitationnel?
- si on fait le calcul pour notre Soleil, on trouve un temps de vie de 10^7 ans (roches lunaires estimées à 10^{10} ans)
- **Réaction nucléaires**
 - changent un type de noyau en un autre
 - si on suppose que le Soleil est 100% d'H et que 10% est converti en He → temps de 10^{10} ans

interaction p-p



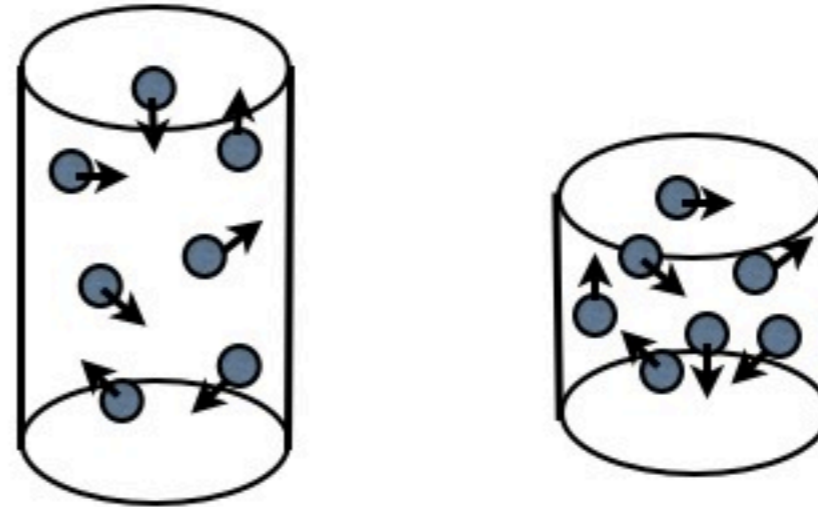
- Si l'énergie vient des mouvements du gaz, il faudrait une température de 10^{10} K au centre de l'étoile pour obtenir la collision entre 2 protons
- température centrale du soleil $\sim 10^7$ K!
- Les réactions de fusions nucléaires se font par **effet tunnel** → impact sur le taux de réactions

- **équation d'état d'un gaz parfait:**

- $PV = N k T$

Diagram illustrating the variables in the ideal gas equation:

- Pressure (Pression) points to P
- Volume (Volume) points to V
- Number of particles (Nombre de particules) points to N
- Temperature (Température) points to T



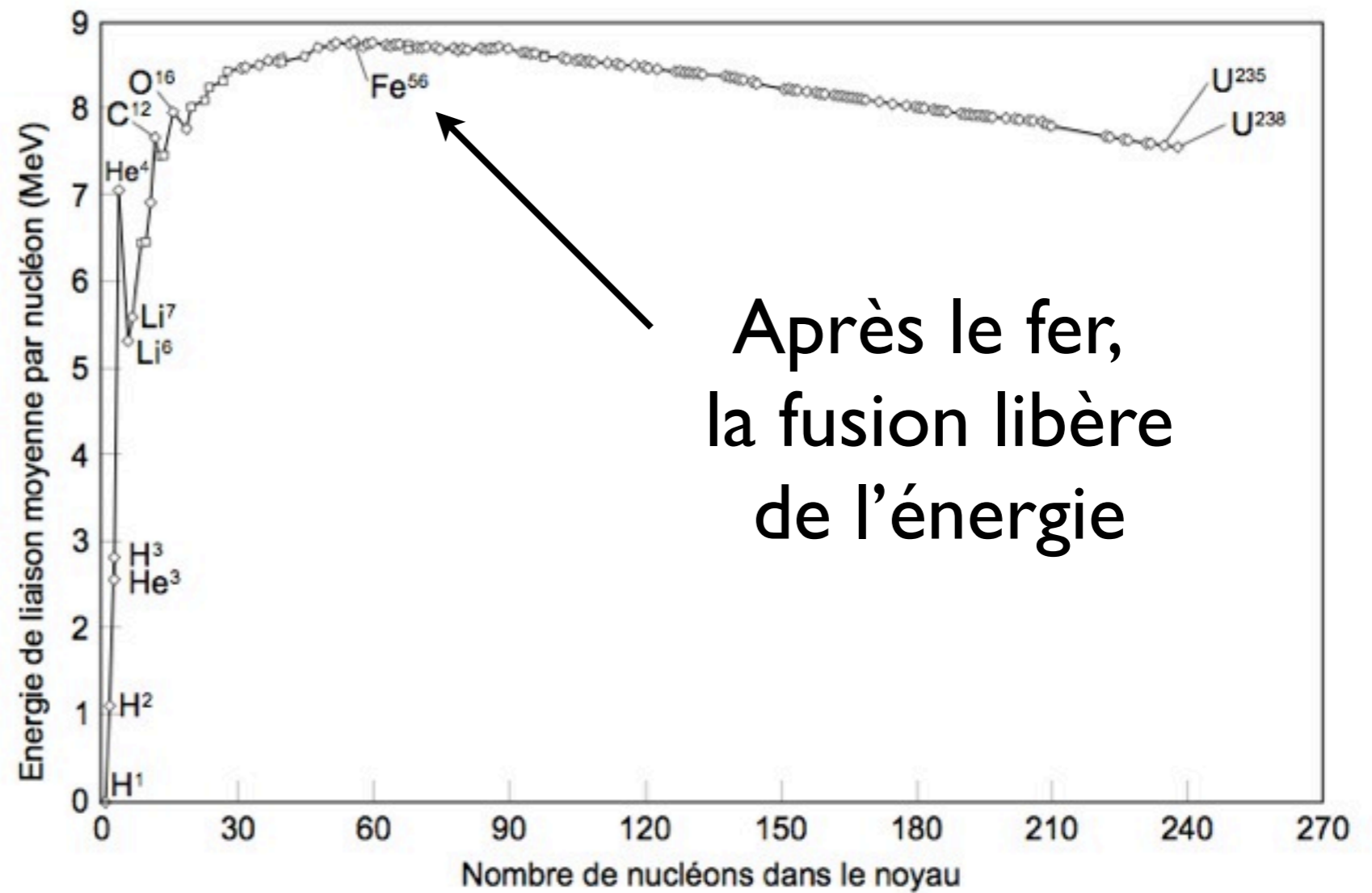
- si ni le volume, ni la température ne changent, alors la pression centrale va diminuer
- L'étoile n'est alors plus en équilibre hydrostatique et commence à s'effondrer, augmentant la température
- Si la température augmente 64 fois, on commence à "bruler" l'He (et donner du C)

Nucléosynthèse stellaire

- Dans un environnement de haute température de combustion de l'He:
 - $C + He \rightarrow O$
 - $O + He \rightarrow Ne$
- Si une étoile est suffisamment massive, on peut avoir la combustion du C ou la combustion de l'O
- Dans l'Univers primordial: H et He
- L'étude de la nucléosynthèse suggère que tous les éléments lourds ont été générés dans les étoiles

“nous sommes tous de la poussière d'étoile”

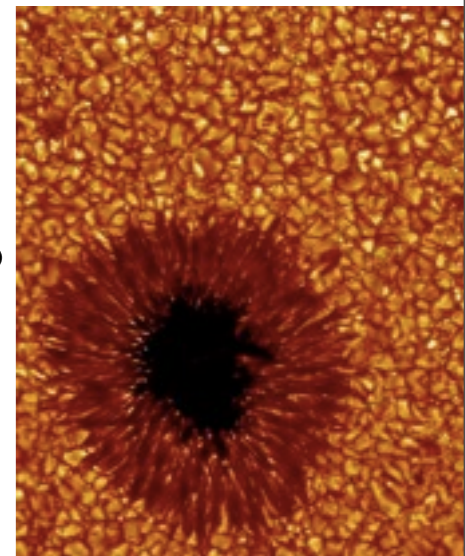
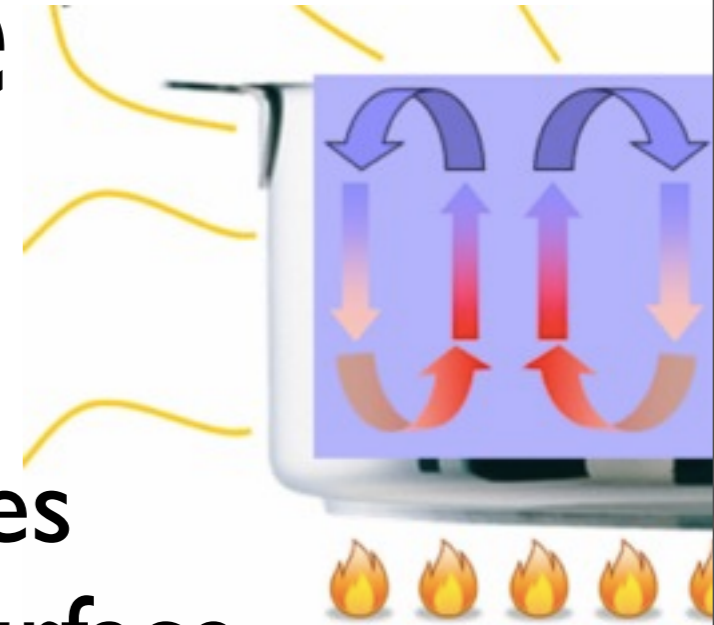
pic du fer



- le résultat ultime des réactions nucléaires dans les étoiles est le Fe
- Les éléments les plus abondants dans le cosmos:
 - H, He, O, C, Ne, N et Fe (résultat des processus nucléaires dominants)

Transport d'énergie et thermodynamique

- 3 mécanismes:
- **rayonnement**: l'énergie produite par les réactions nucléaires est portée à la surface par les photons
- **convection**: les éléments chauds portent une énergie en excès vers l'extérieur et les éléments froids tombent vers le centre
- conduction (généralement négligeable)

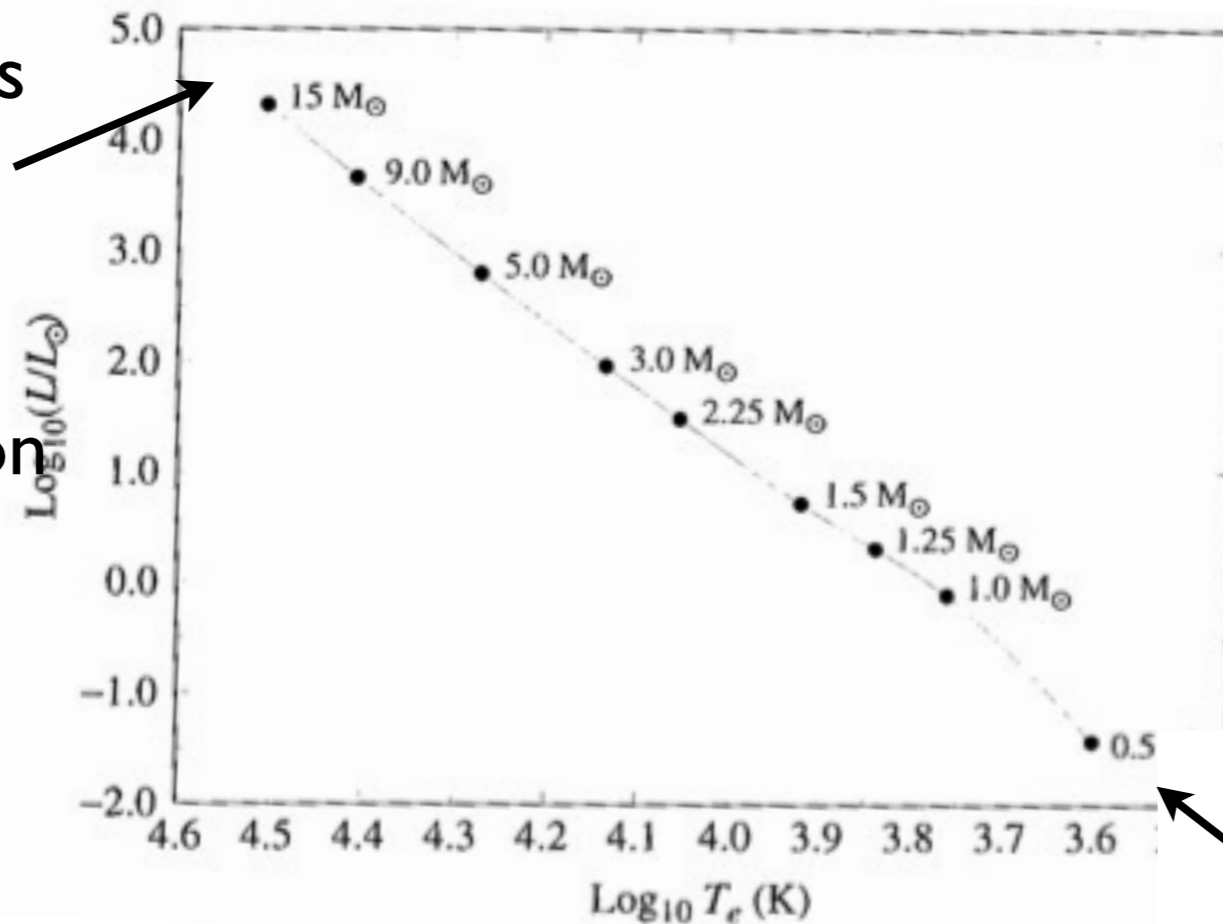


Théorème de Vogt-Russell

- La masse et la composition d'une étoile déterminent de manière unique son rayon, sa luminosité, sa structure interne, et son évolution
- C'est la conséquence du changement de composition dû à la combustion nucléaire
(mais aussi champs magnétiques, rotation)

La séquence principale

oscillations thermiques
au centre, variations
taux nucléaires
en qq heures
→ empêche la formation
d'étoiles stables



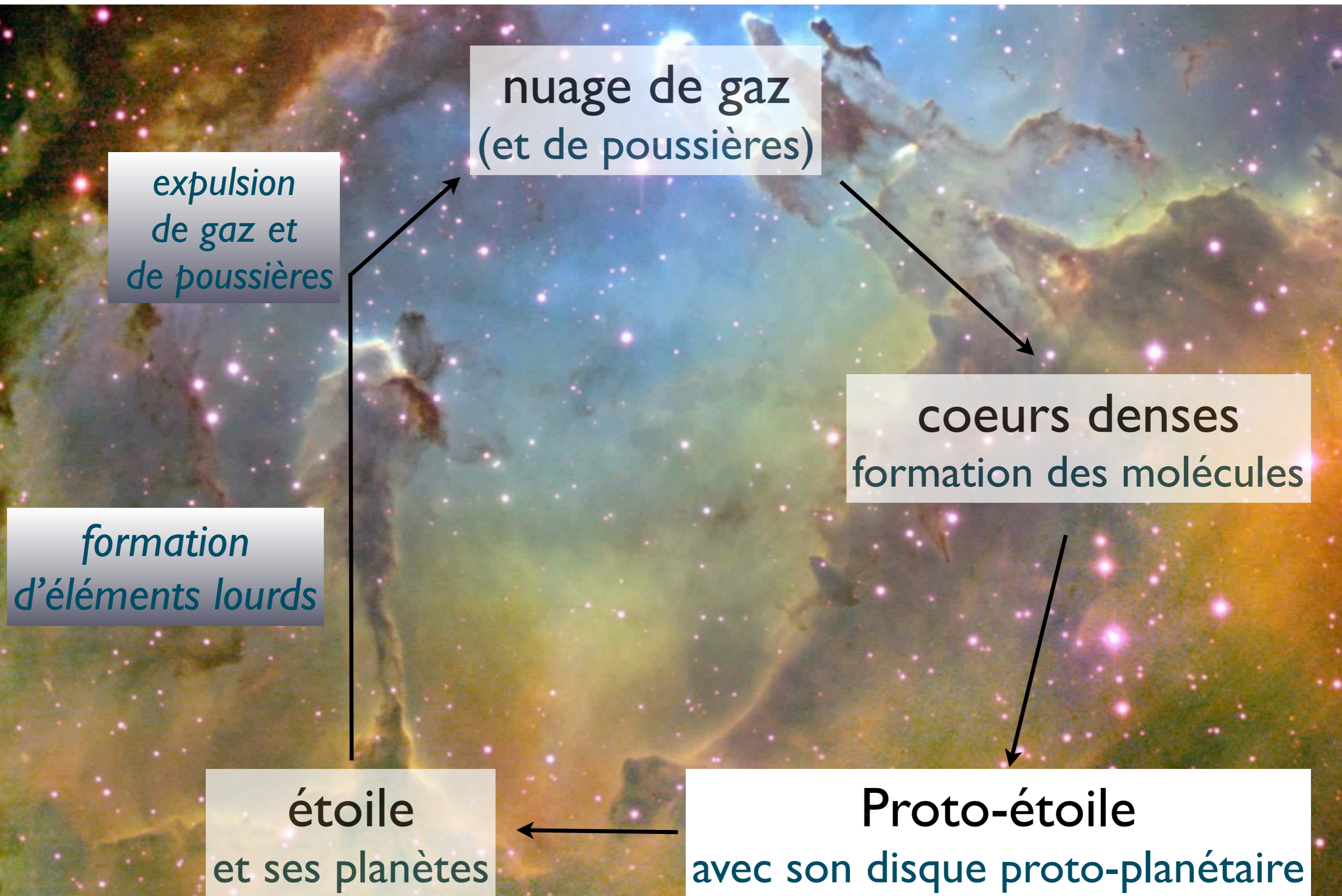
température centrale
trop faible pour
des réactions nucléaires

variations de 3 ordres de grandeur en masse pour 9
ordres de grandeur en luminosité

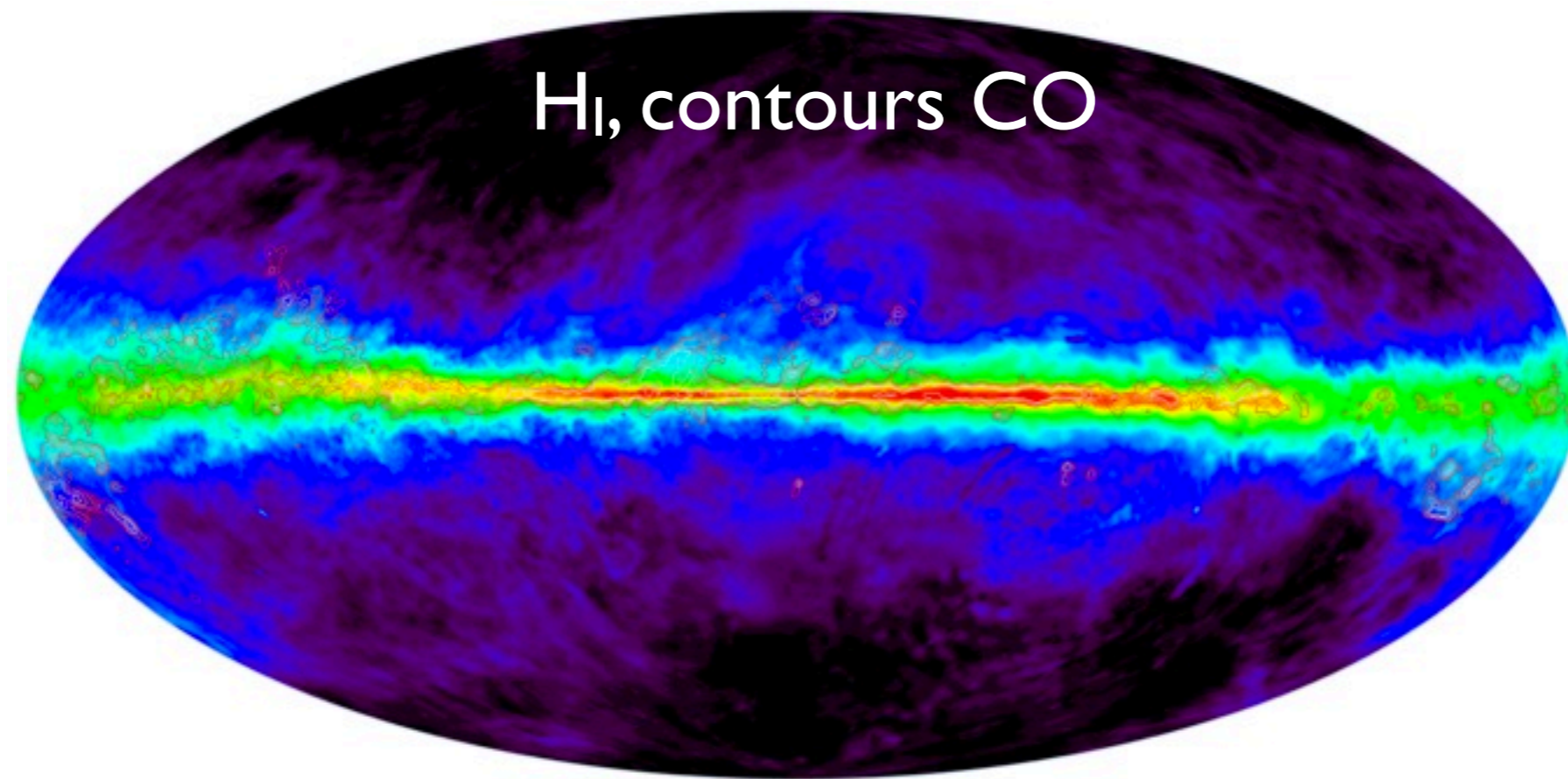
→ les étoiles les plus massives consomment leur
gaz plus vite que les étoiles les moins massives

La formation des étoiles

le cycle de vie du milieu interstellaire

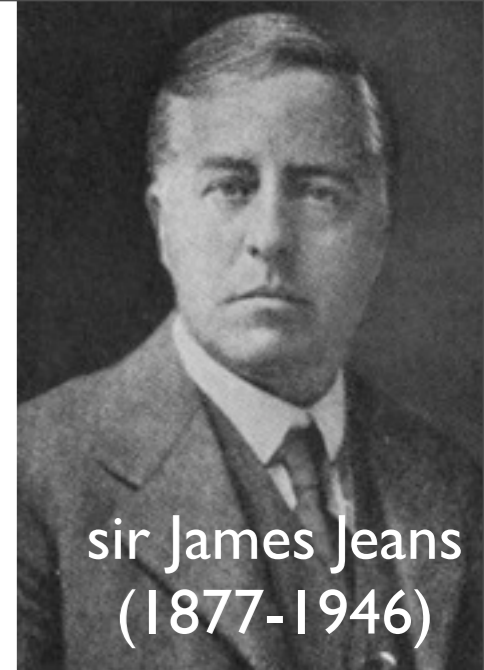


des nuages neutres à moléculaires



- Les étoiles se forment dans les nuages moléculaires
- Composition des nuages de gaz: H, puis d'He et quelques % pour les métaux comme C, Si, ... qui forment la poussière
- La plupart des nuages sont diffus (hydrogène neutre=H_I) mais quand l'extinction devient assez grande (la densité devient grande) alors on peut former des molécules (H₂, traceur=CO)

Effondrement des nuages moléculaires



énergie cinétique interne
(mouvements)

énergie potentielle
(gravité)



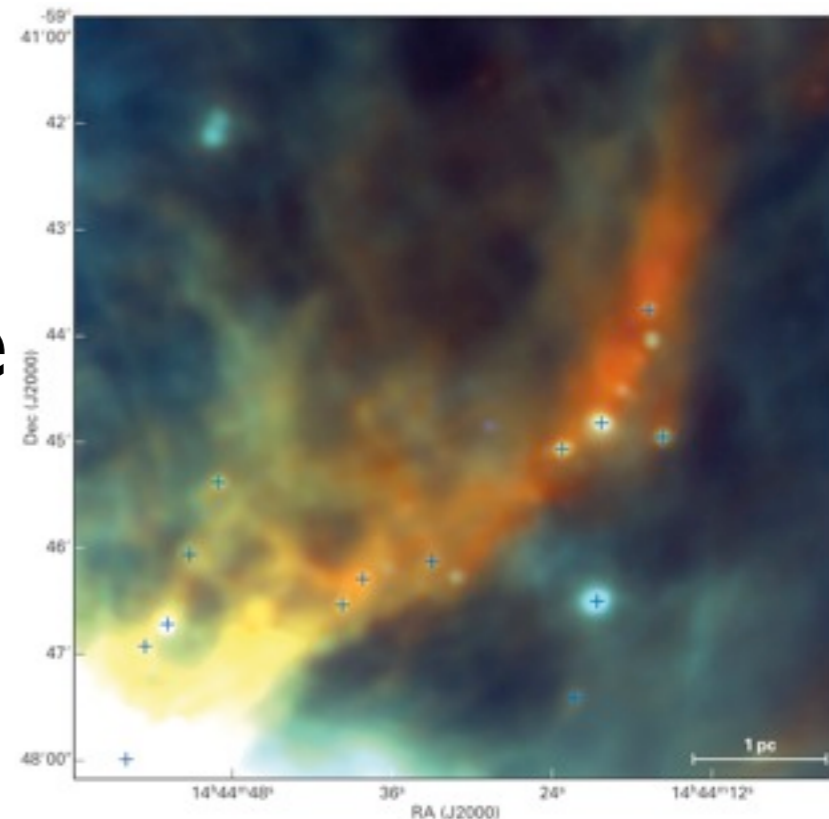
- Théorème du viriel: $2K + U = 0$
- Si l'énergie cinétique interne est trop faible, le nuage va s'effondrer
- **Masse de Jeans, Rayon de Jeans** définissent la masse minimum ou le rayon minimum pour qu'un nuage de densité définie s'effondre

Processus de fragmentation

- Les observations montrent que **les étoiles se forment en groupes** (étoiles binaires, amas d'étoiles)
- Quand l'effondrement d'un nuage a commencé, les petites inhomogénéités en densité vont satisfaire le critère de Jeans indépendamment et s'effondrer localement
- **La fragmentation s'arrête** quand l'énergie due à l'effondrement n'est plus rayonnée efficacement en dehors du nuage (=limite adiabatique)

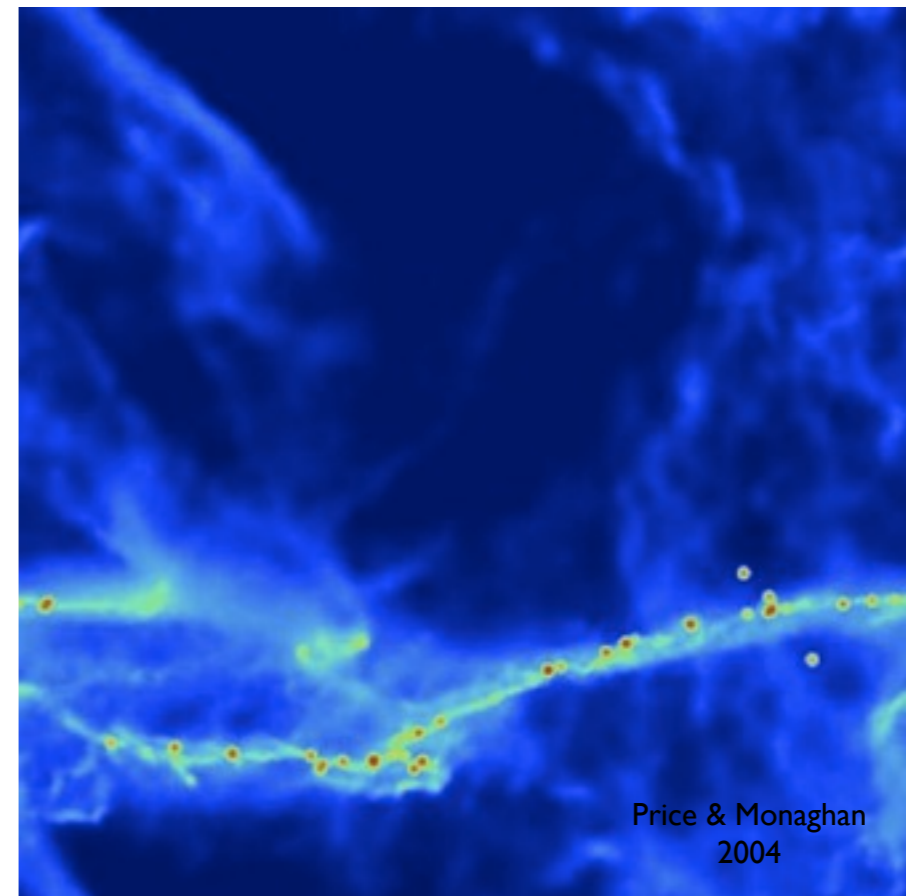
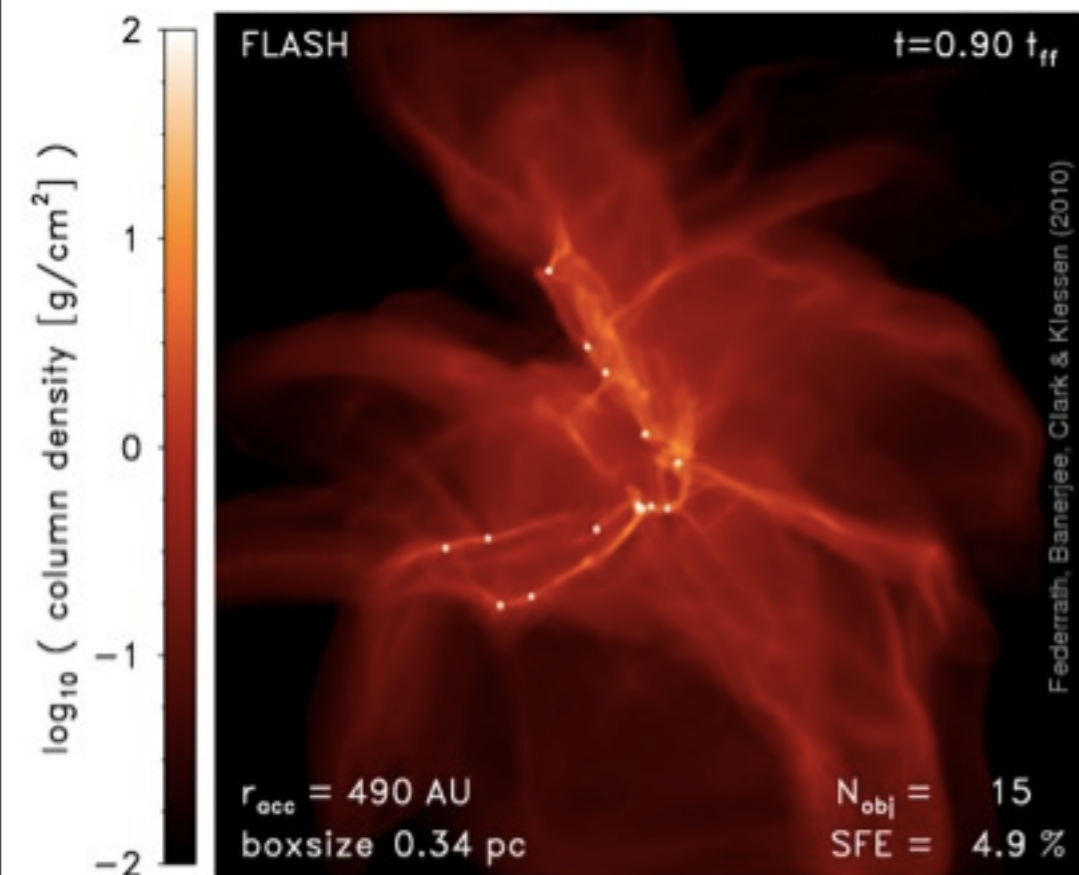
Proto-étoiles

- Si l'énergie ne sort plus du coeur moléculaire, alors la pression augmente et on obtient un état d'équilibre de la région centrale. C'est la **proto-étoile**
- Au dessus du coeur protostellaire, la matière est toujours en chute libre
 - **ondes de choc** à la surface
 - la matière est **supersonique**
 - la matière perd beaucoup d'énergie par chauffage et c'est ce qui produit la plupart de la luminosité



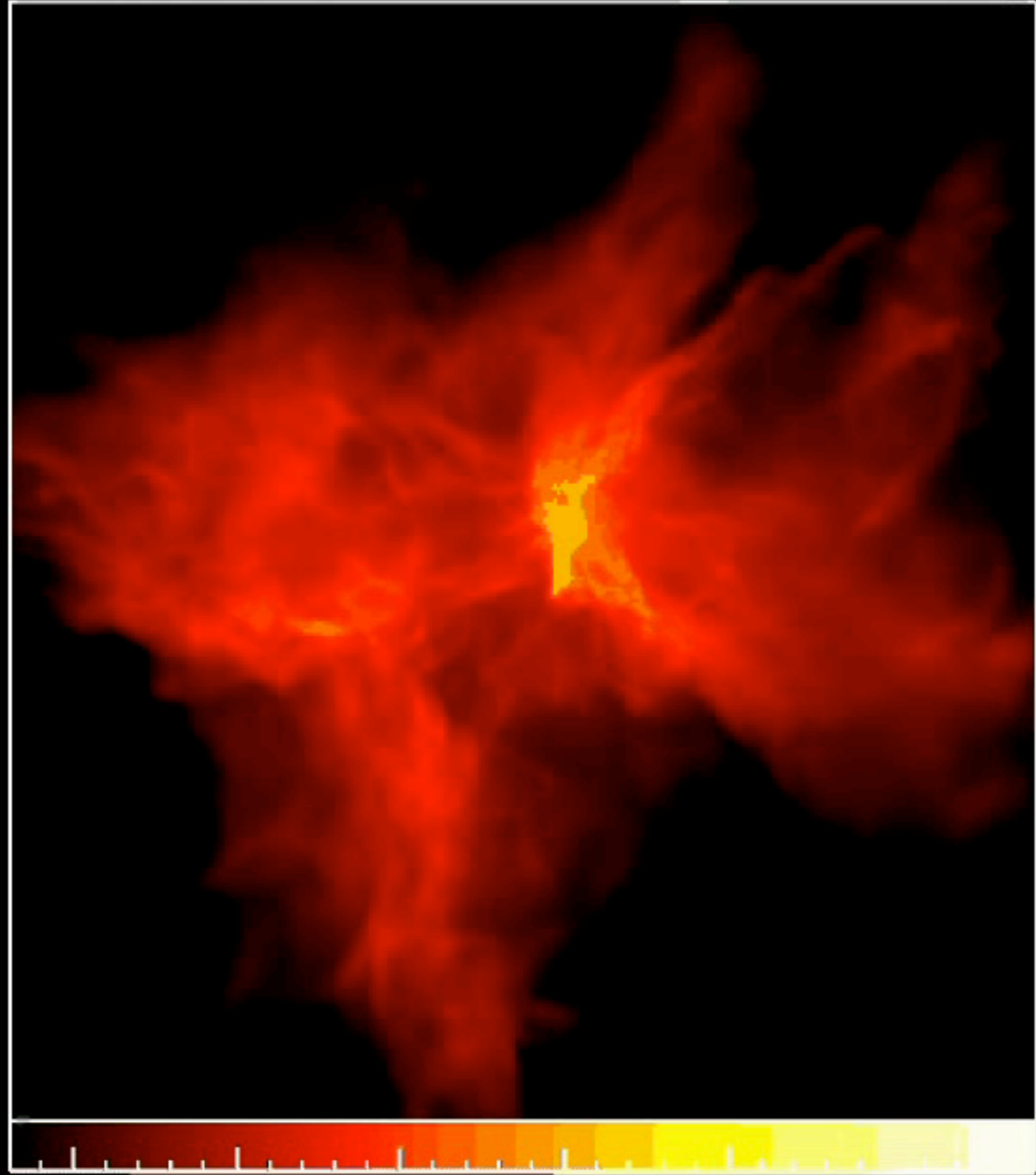
Simulations de formation d'étoiles

- Mais il y a aussi: la vitesse initiale des nuages, les chocs, la rotation, la symétrie qui n'est pas sphérique, le champ magnétique
- Résolution numérique d'équations hydrodynamiques



Dimensions: 82500. AU

Time: 197220. yr



-1.5

-1.0

-0.5

0.0

0.5

1.0

Log Column Density [g/cm^2]

Matthew Bate

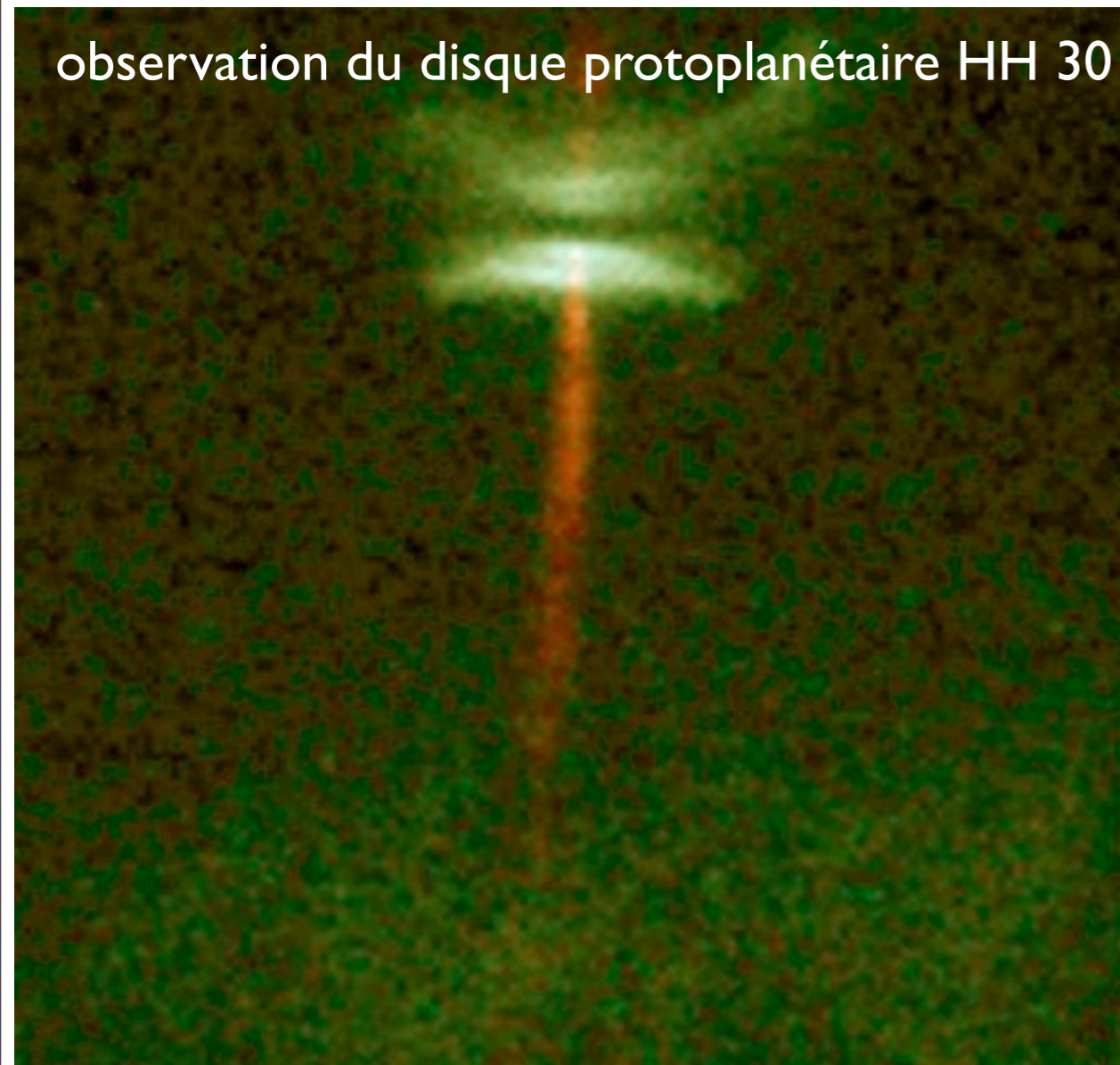
Evolution pré-séquence principale

- processus beaucoup plus lent que l'effondrement
- la température centrale continue d'augmenter, les niveaux d'ionisation augmentent et l'opacité diminue : un coeur radiatif se développe
- La source principale d'énergie est gravitationnelle
 - Premières réactions nucléaires mais pas d'équilibre au début

YSOs

- Young Stellar Objects
 - proto-étoiles
 - étoiles pré-séquence principale

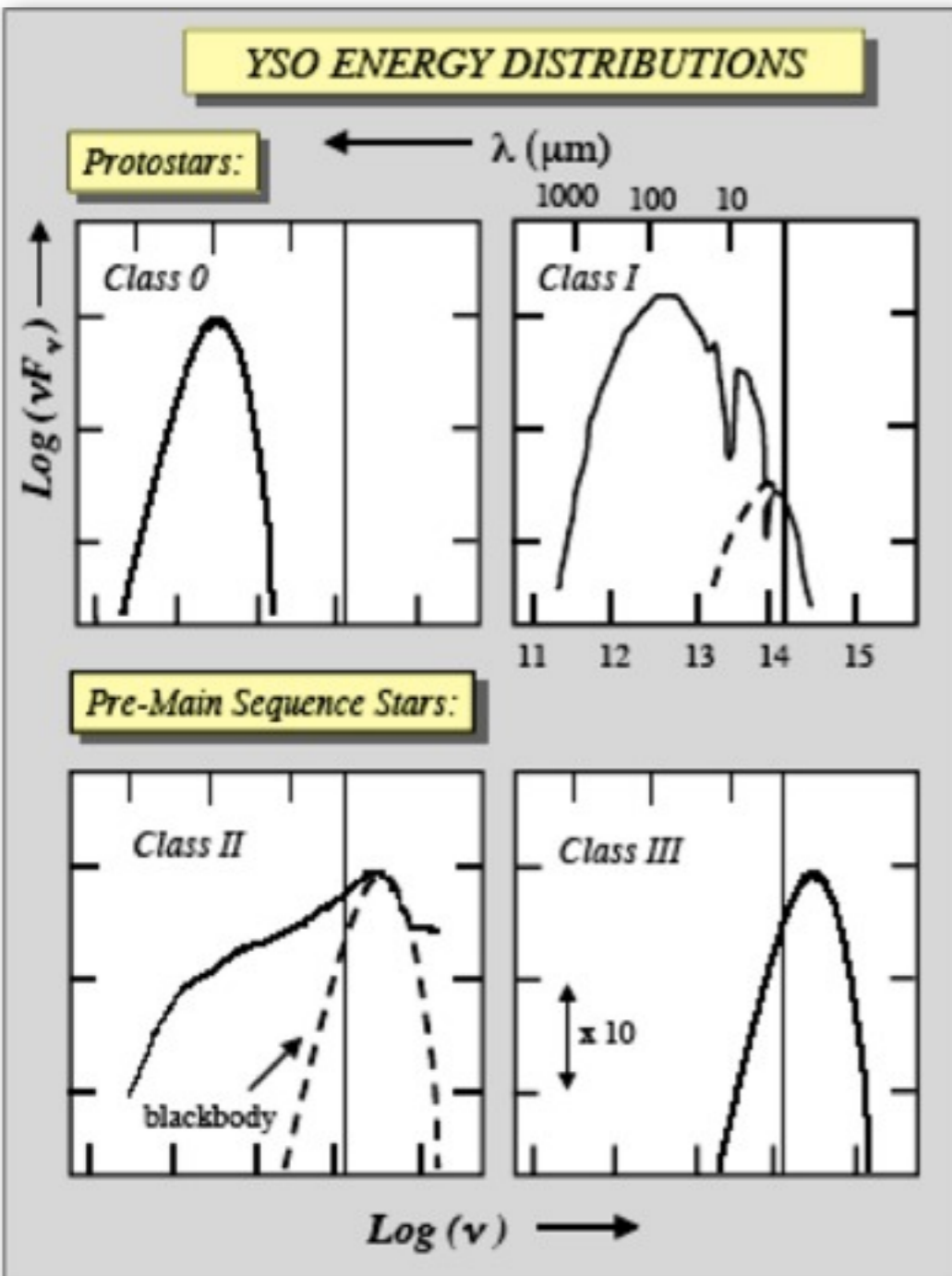
observation du disque protoplanétaire HH 30



vue d'artiste d'une protoétoile dans un globule de Bok

Classification

Basées sur leur indice spectral (Lada et al. 1987):

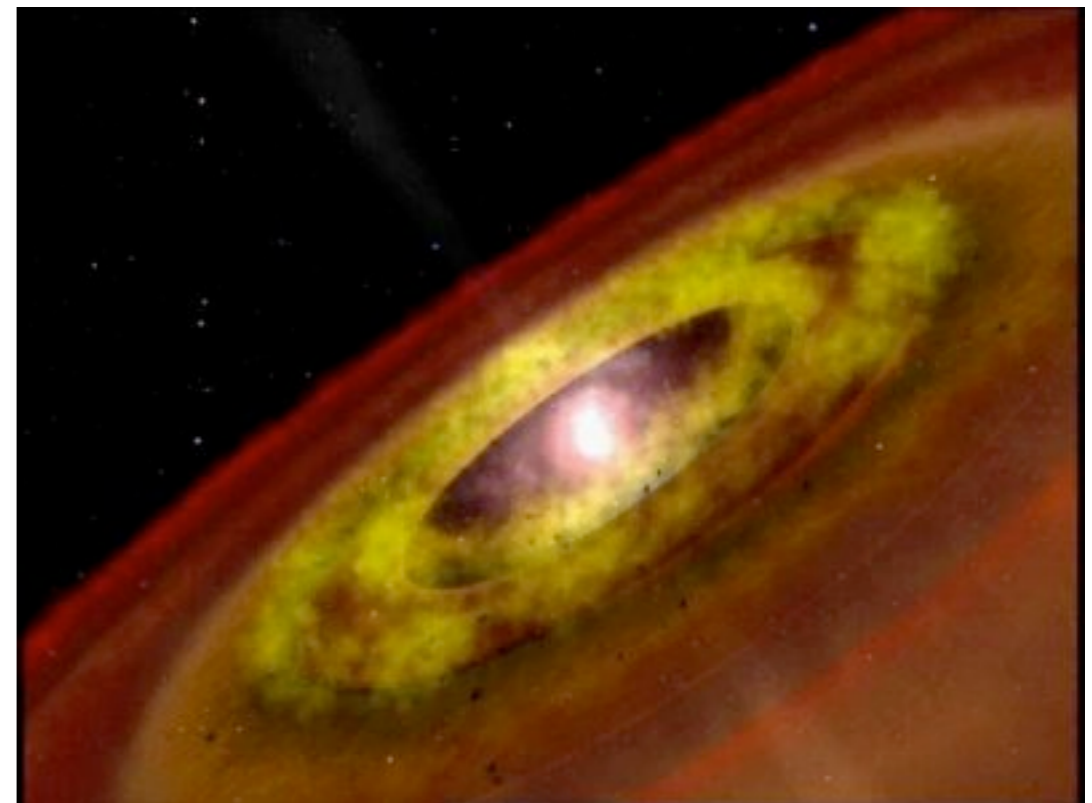
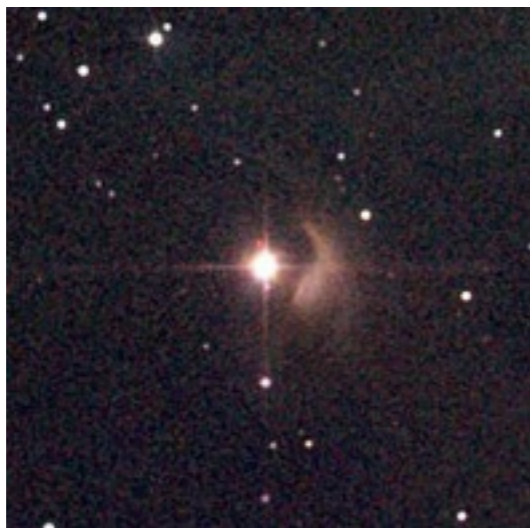


- **Class 0** sources – undetectable at $\lambda < 20\mu\text{m}$
- **Class I** sources have $\alpha > 0.3$
- **Flat spectrum** sources have $0.3 > \alpha > -0.3$
- **Class II** sources have $-0.3 > \alpha > -1.6$
- **Class III** sources have $\alpha < -1.6$

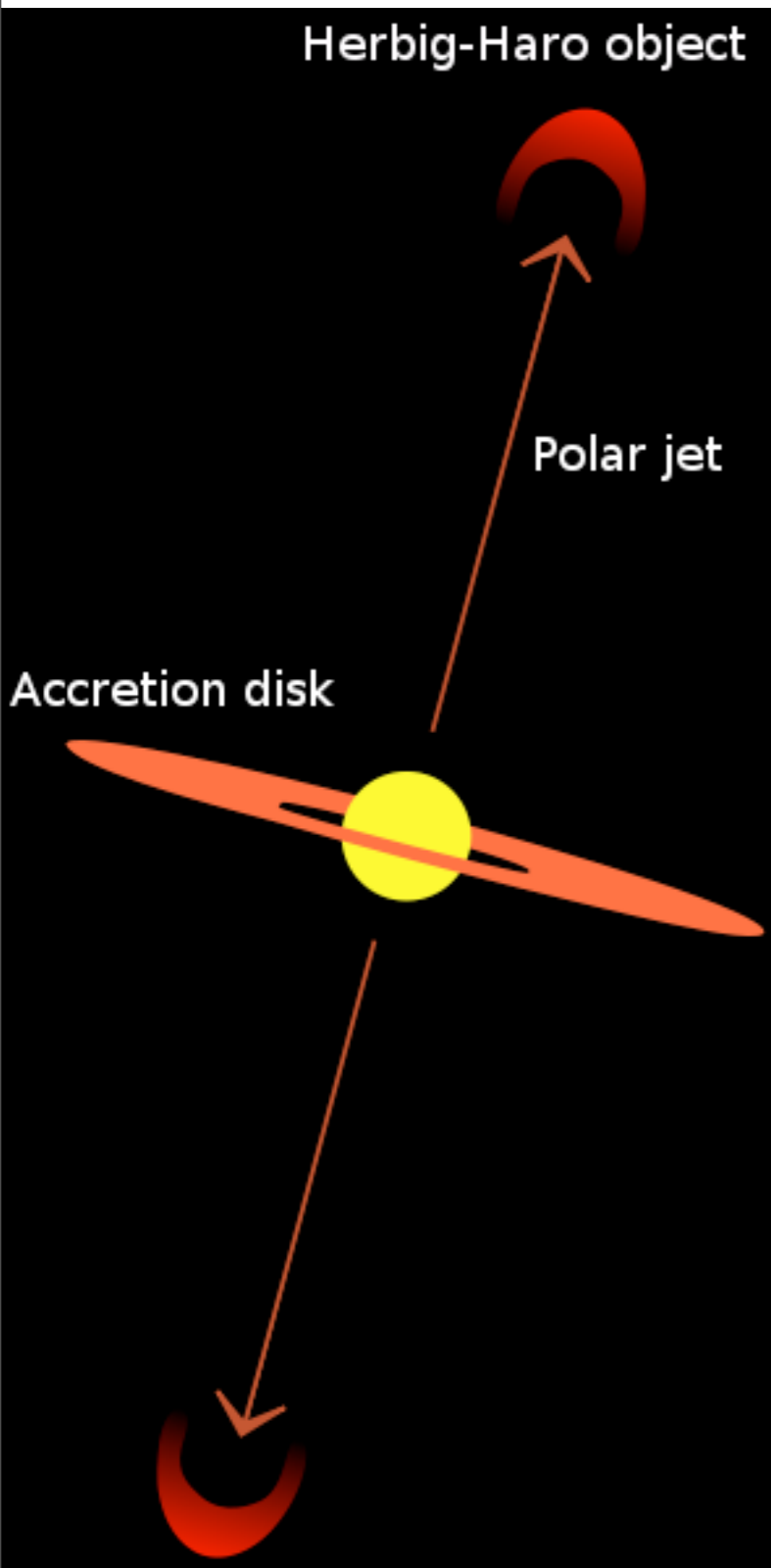
Class	peak emission	duration (Years)	description
0	submillimeter	10^4	early accretion
I	far-infrared	10^5	main accretion phase
II	near-infrared	10^6	classic T Tauri star
III	visible	$10^{7[2]}$	'weak line' T Tauri star

étoiles T Tauri

- détection dans le visible d'étoiles jeunes ou pré-séquence principale
- nom donné à partir du prototype de ces étoiles T Tau
- remarquables par leur variabilité + raies (Balmer + Call)



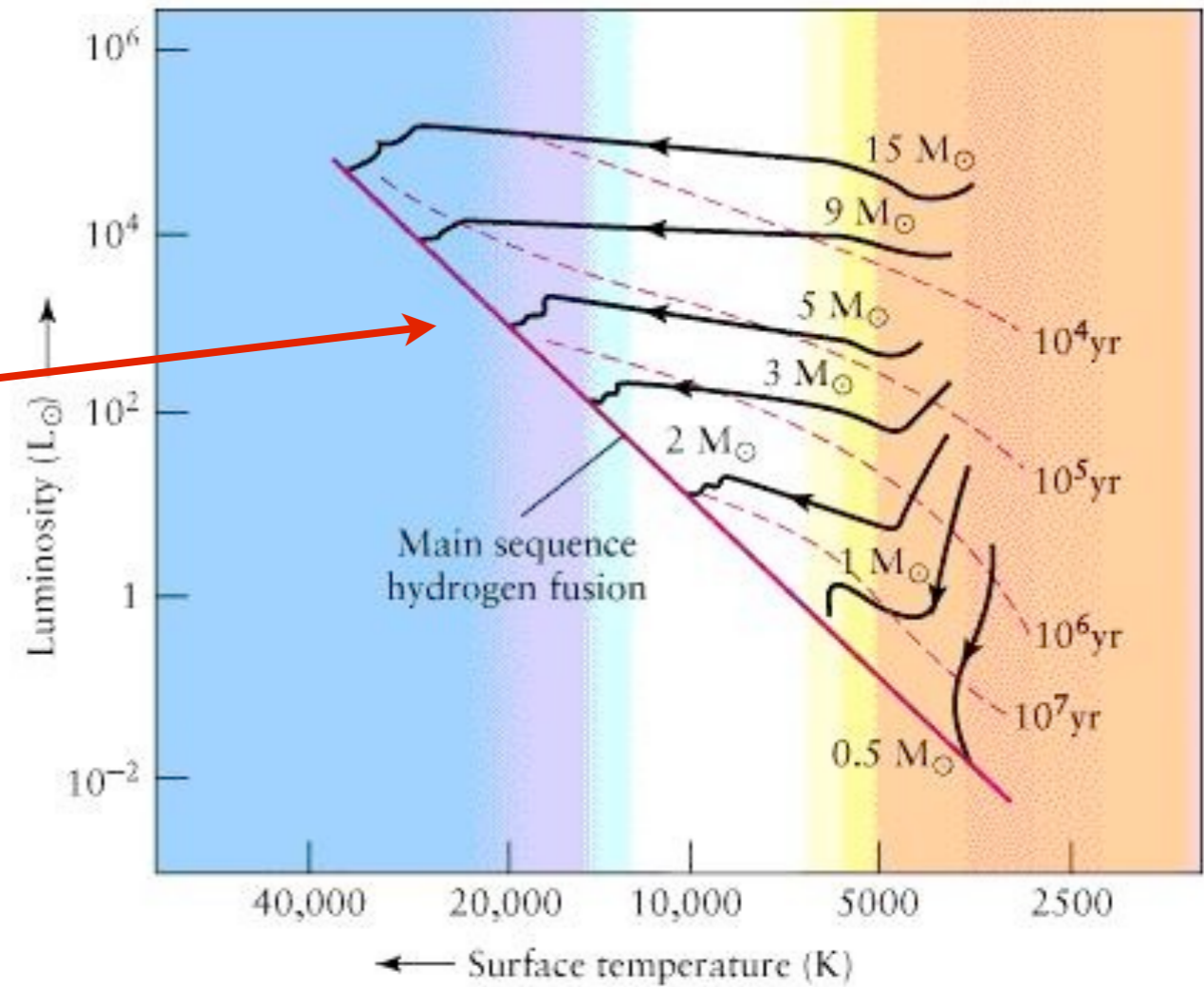
caractéristiques des YSOs



- au moins la moitié des étoiles T-Tauri ont un **disque circumstellaire/ protoplanétaire**
- **jets, objets Herbig-Haro**

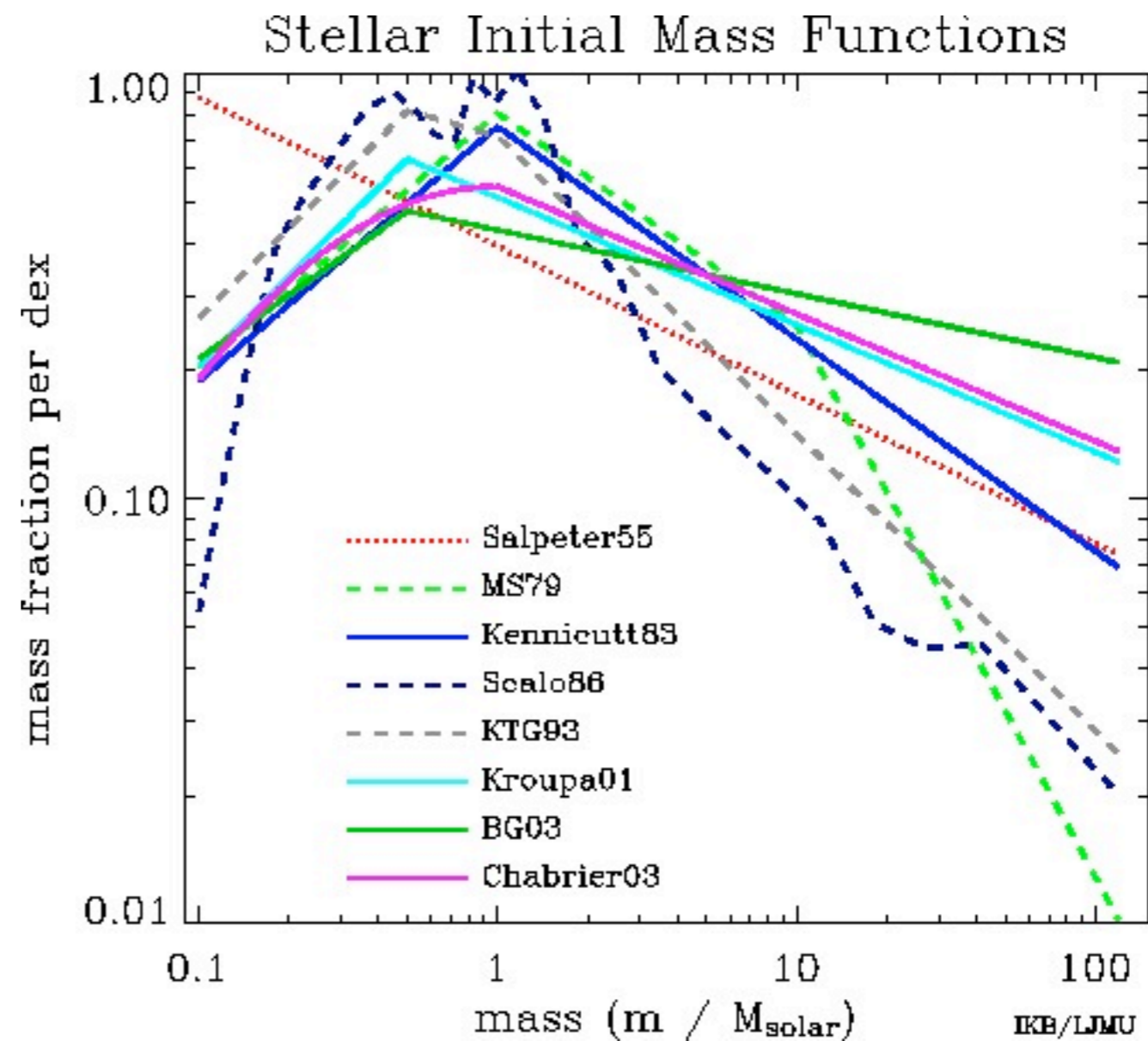


ZAMS
= Zero Age Main Séquence



- Le temps mis par une étoile pour atteindre la ZAMS est inversement proportionnel à leur masse

IMF



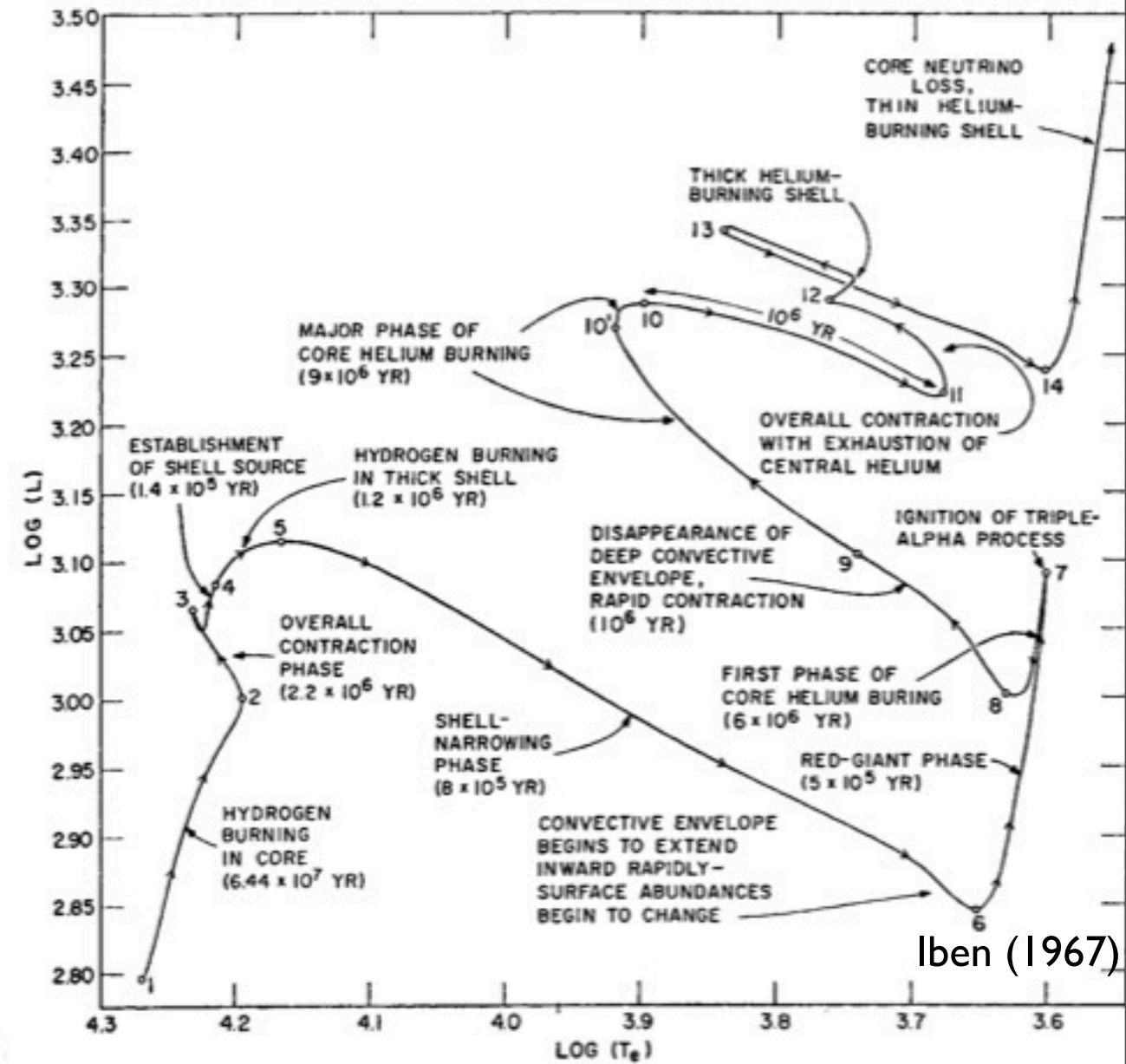
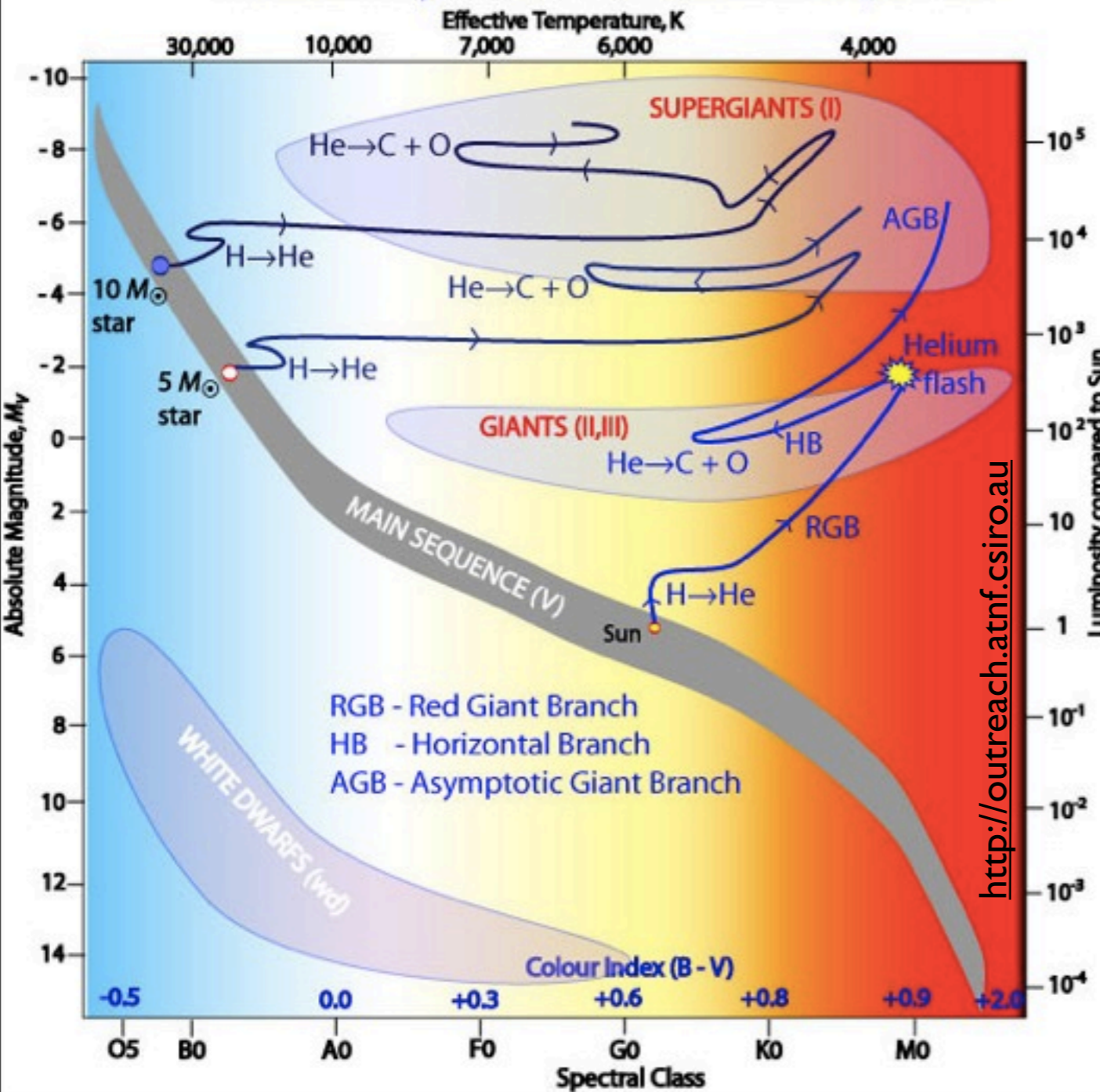
- “Initial Mass Function” = nombre d’étoiles qui se forment par intervalle de masse
- Quand un nuage se fragmente, on forme plus d’étoiles de faible masse que d’étoiles de forte masse

Evolution sur la séquence principale et après

Evolution sur la séquence principale

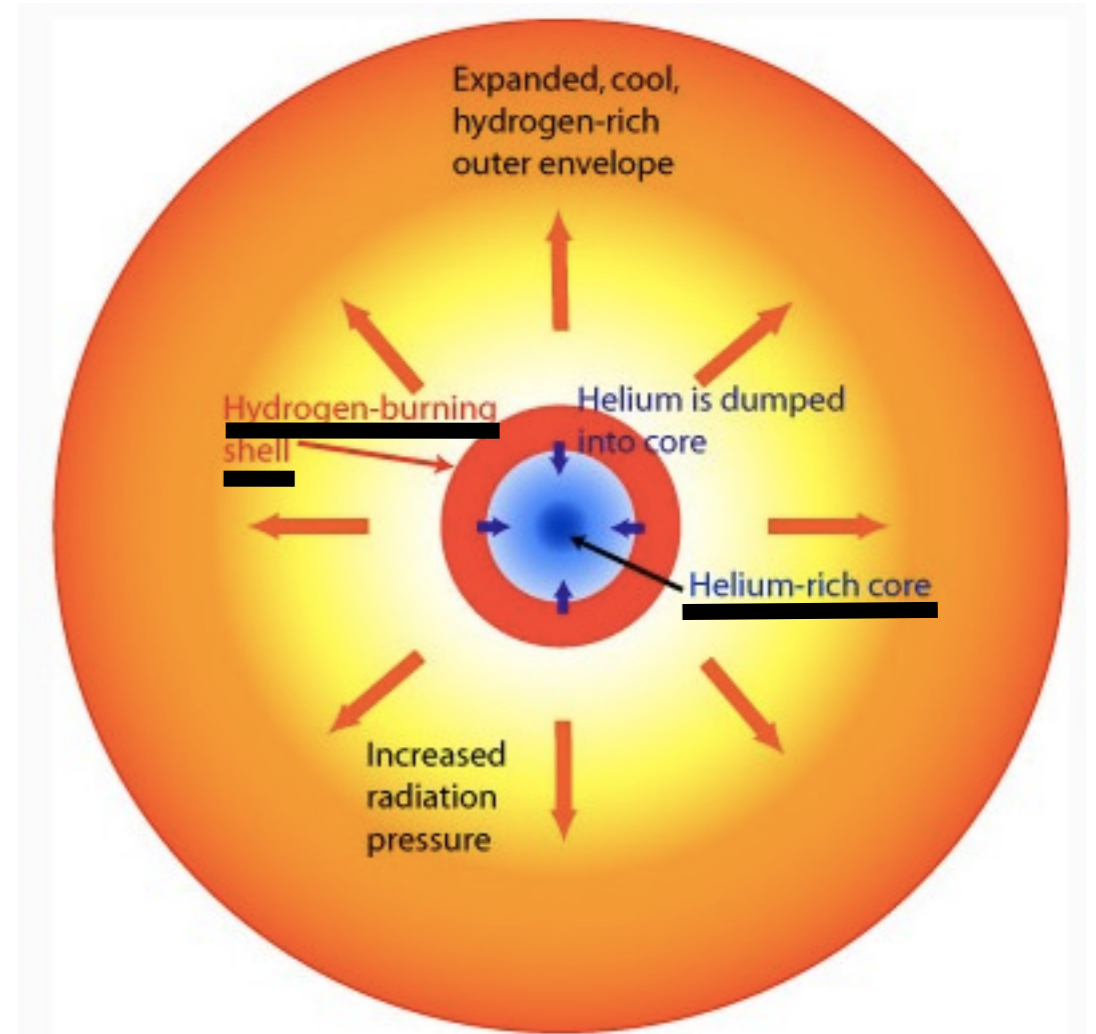
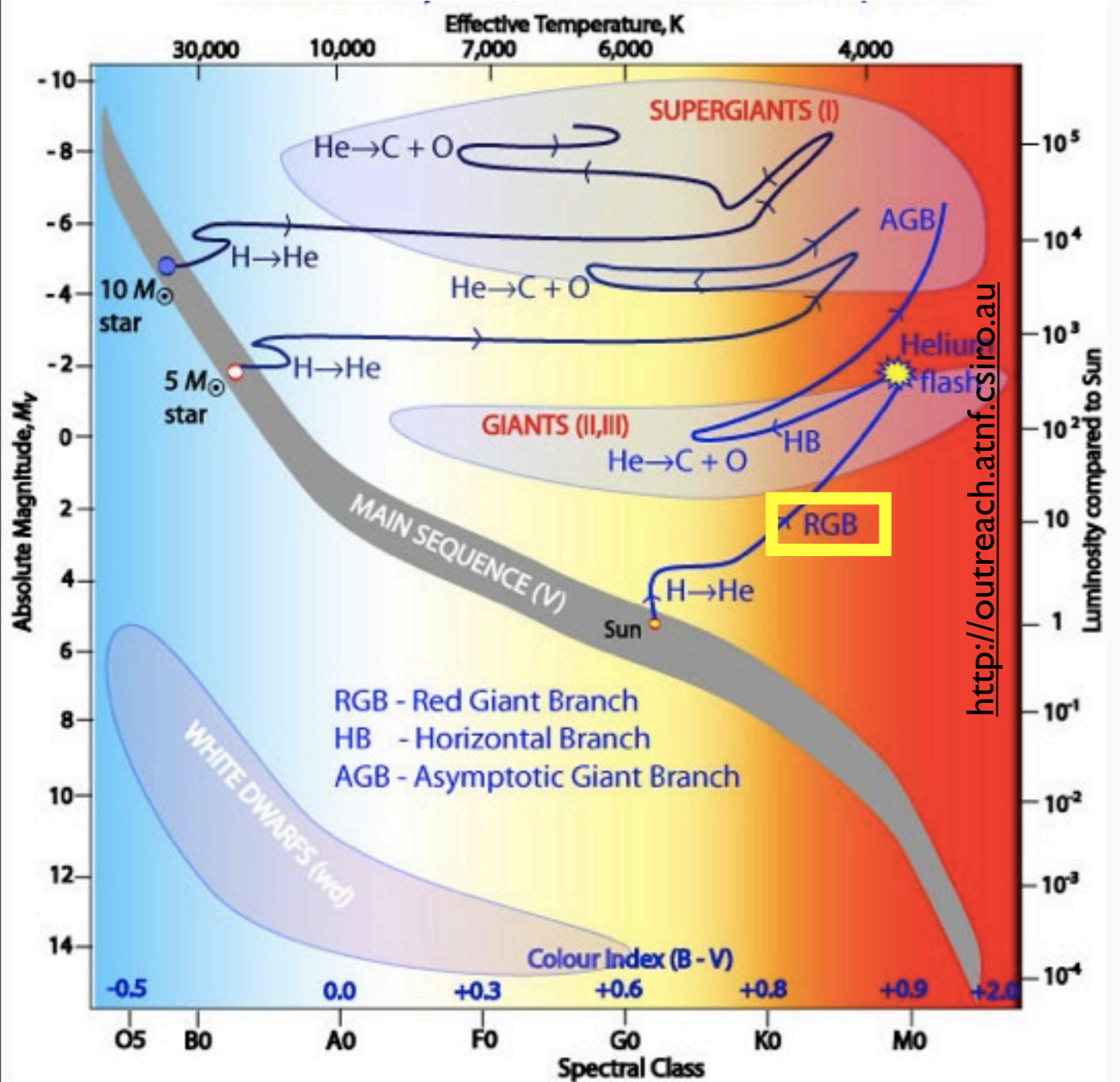
- C'est là que l'on trouve le plus d'étoiles car c'est là que les étoiles passent le plus de temps
- **Source d'énergie principale:**
 - avant la séquence principale: **gravitation**
 - pendant la séquence principale: **réactions nucléaires**
 - après la séquence principale: **alternance des 2**

Evolution dans le diagramme HR



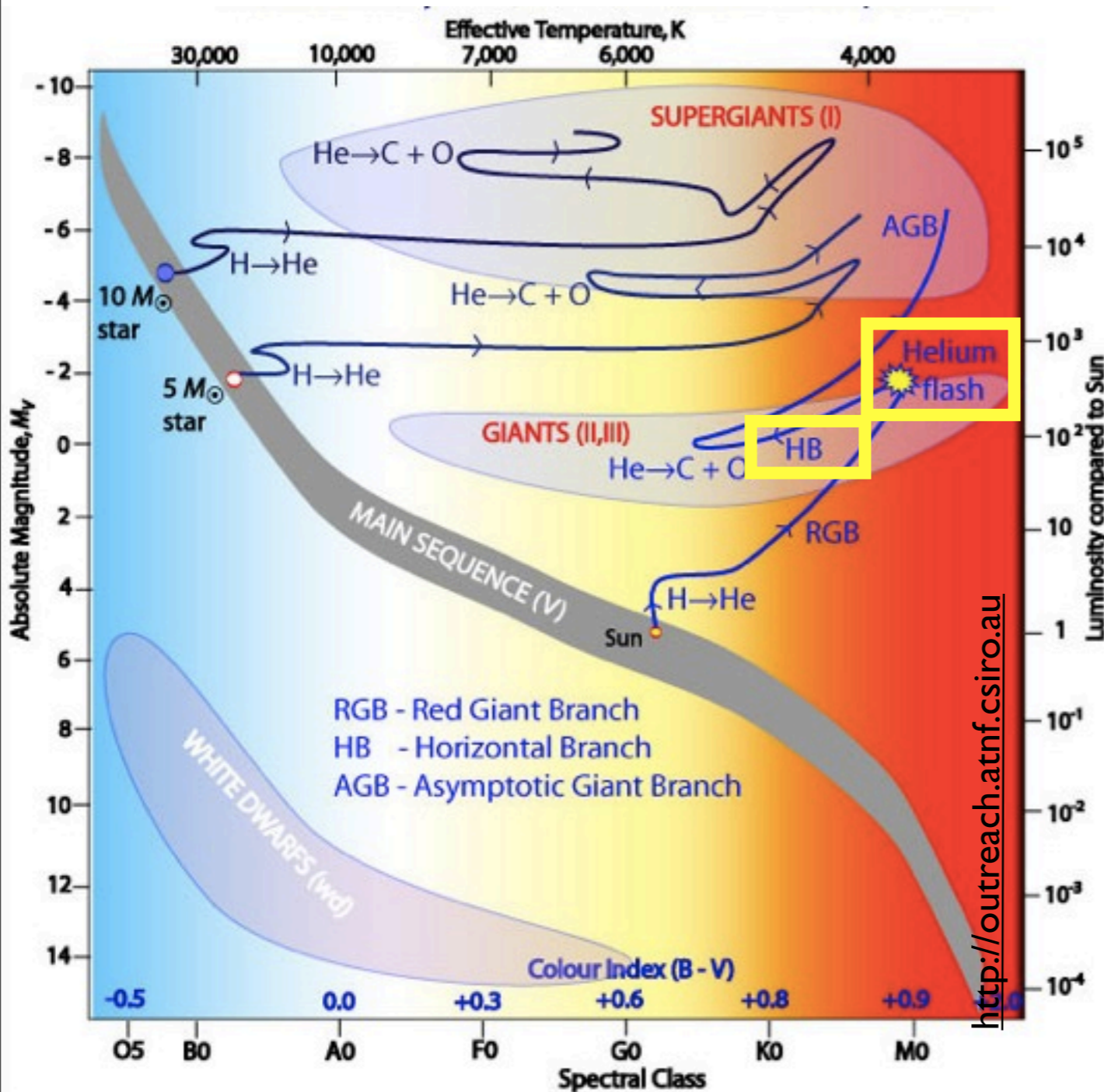
Une suite complexe de contraction, expansion, formation de différentes coquilles à chaque changement de “combustible”

Evolution d'une étoile comme le Soleil ($< 2M_{\odot}$)



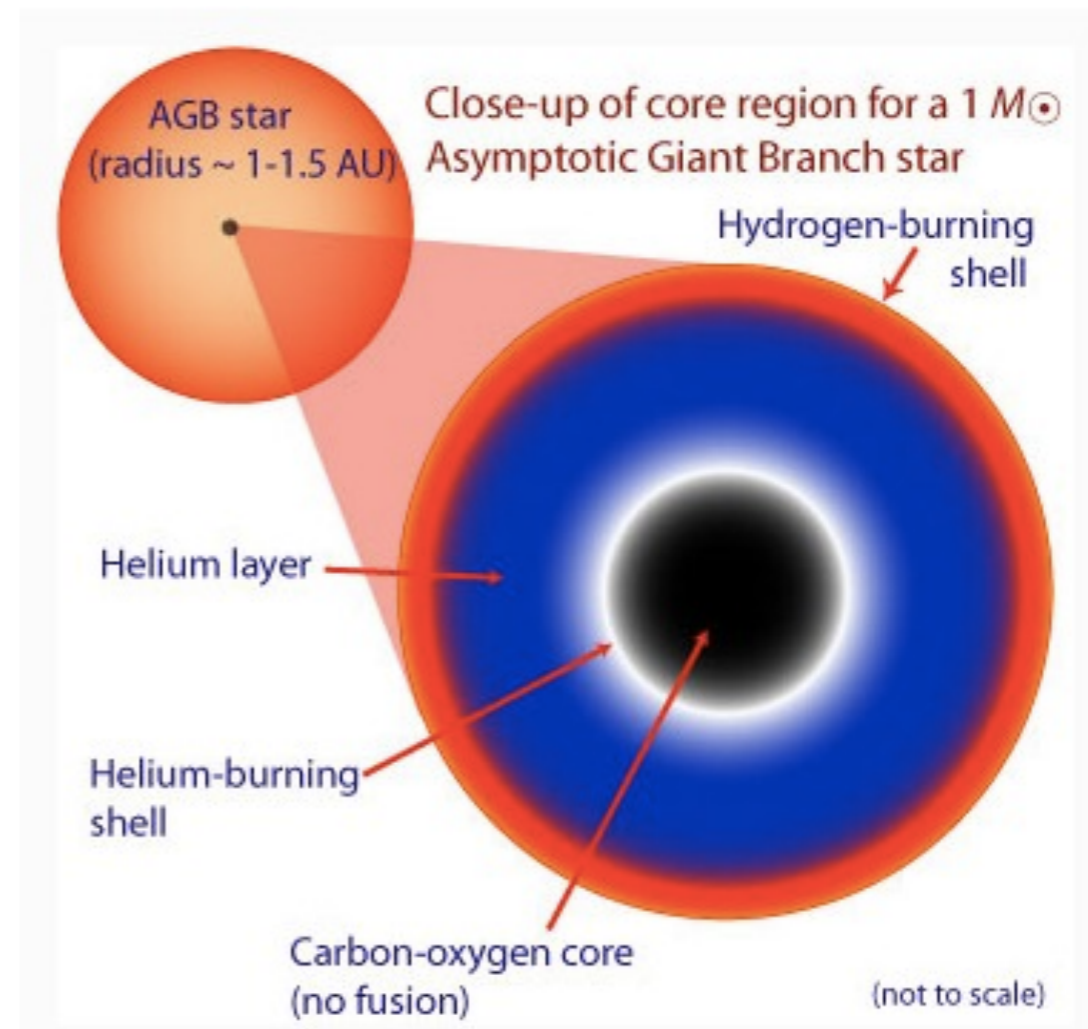
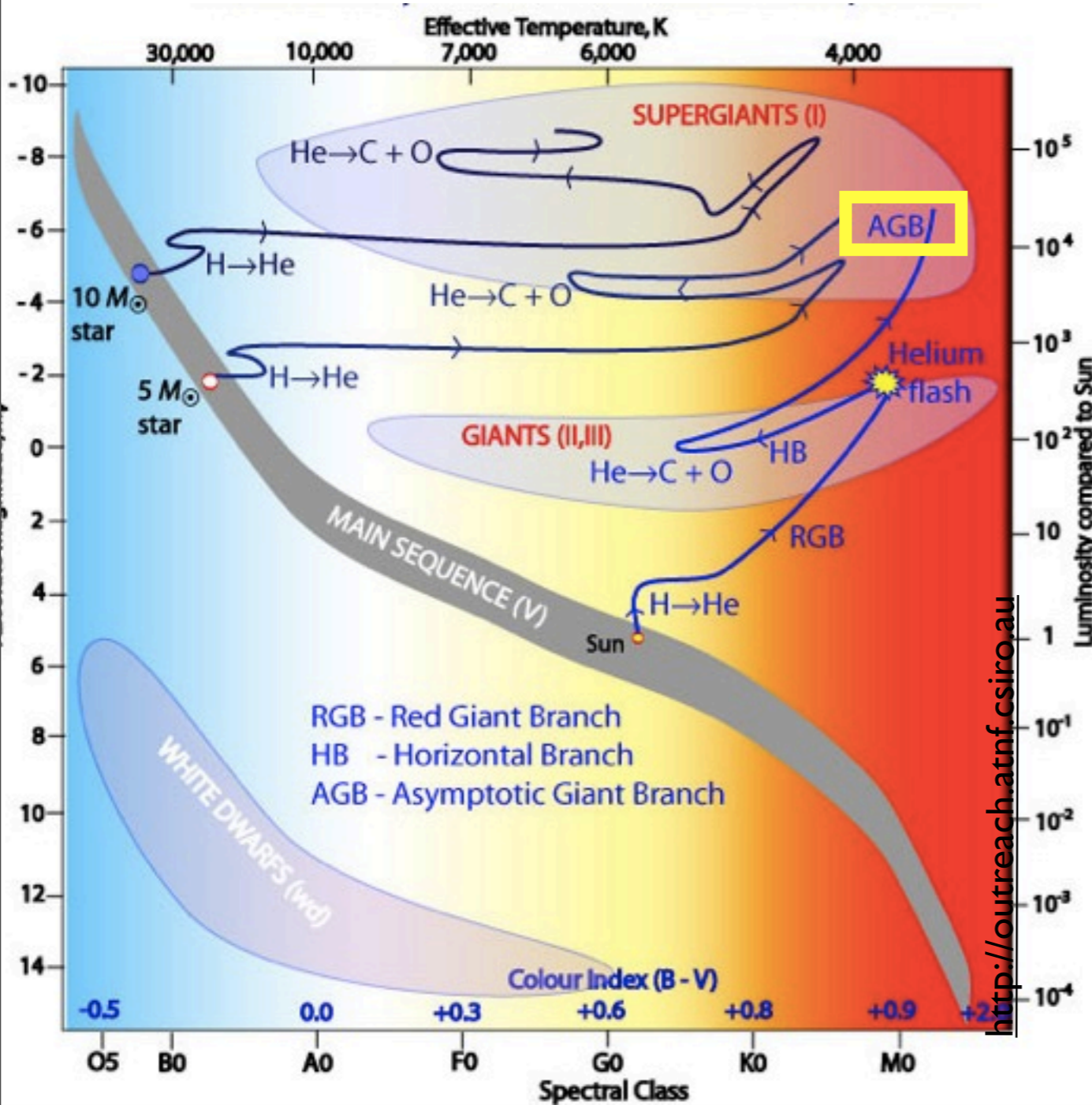
étoiles RGB

“red giant branch”



flash de l'Hélium:
effondrement du coeur
 -> très grosse source d'énergie (~ à une galaxie) mais qui n'atteint pas la surface

Pendant leur passage par la **branche horizontale**, beaucoup d'étoiles développent des instabilités dans leurs enveloppes externes qui donnent des pulsations observables



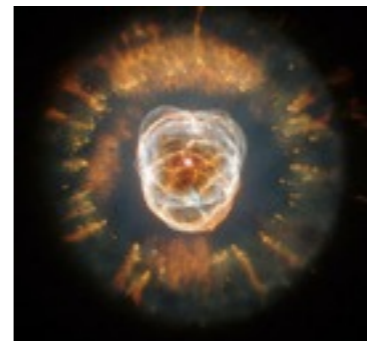
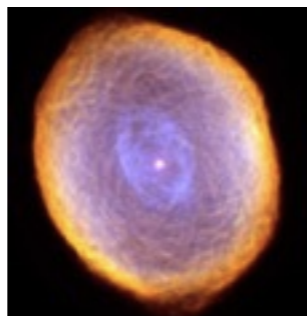
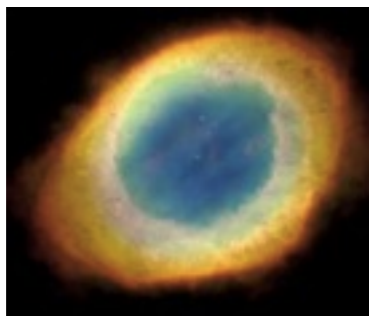
Etoiles AGB

“Asymptotic Giant Branch”

Les étoiles dans la phase AGB peuvent perdre beaucoup de masse (jusqu'à $10^{-4} M_{\odot}/\text{an}$), ce qui va enrichir le milieu interstellaire

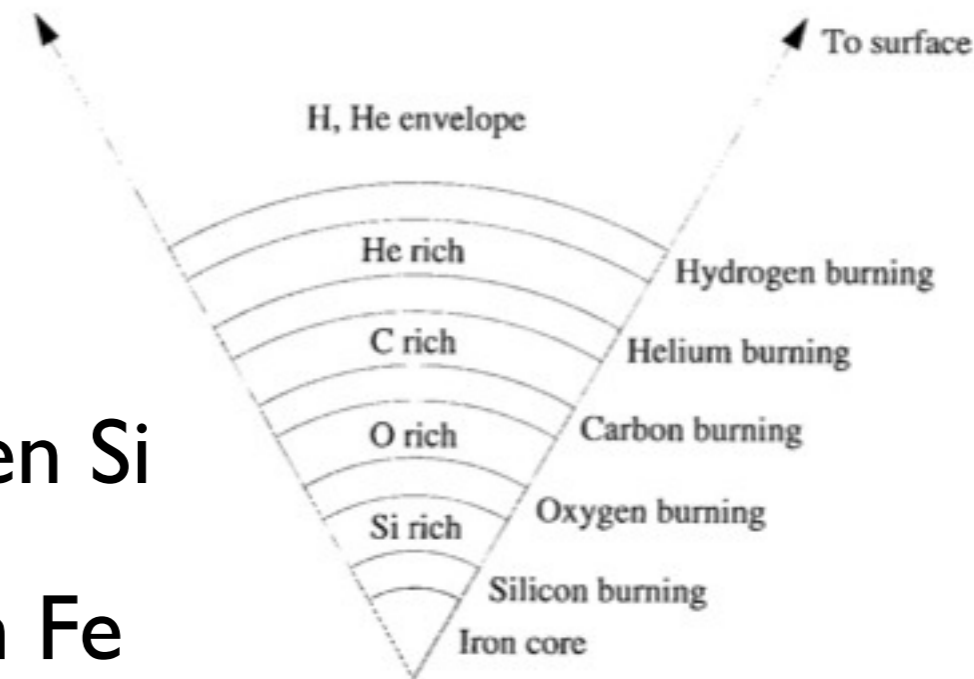
Evolution après le stade AGB

- Dépend de la masse
- Cas des étoiles $M^{(ZAMS)} < 8M_{\odot}$:
 - coeur de C et O qui va se contracter
 - grosses pertes de masse, super-vents, **sources OH/IR**
 - le nuage s'étend, il expose l'étoile centrale. Puisqu'il n'y a plus de couches au dessus, la combustion d'H et d'He s'éteint, l'objet se refroidit et devient une **naine blanche**
 - couche de gaz en expansion -> **nébuleuse planétaire**



Le destin des étoiles massives

- $M^{(ZAMS)} > 8M_{\odot}$ vont pouvoir démarrer la combustion du C et O
- combustion du C \rightarrow O, Ne, Na, Mg
- **structure** de l'étoile **en onion**
- combustion de l'O \rightarrow coeur riche en Si
- combustion du Si \rightarrow coeur riche en Fe
- La combustion des carburants successifs donne des éléments de + en + proches du pic du Fe \rightarrow de - en - d'énergie produite par unité de fuel \rightarrow **le temps entre chaque étape est de plus en plus court**



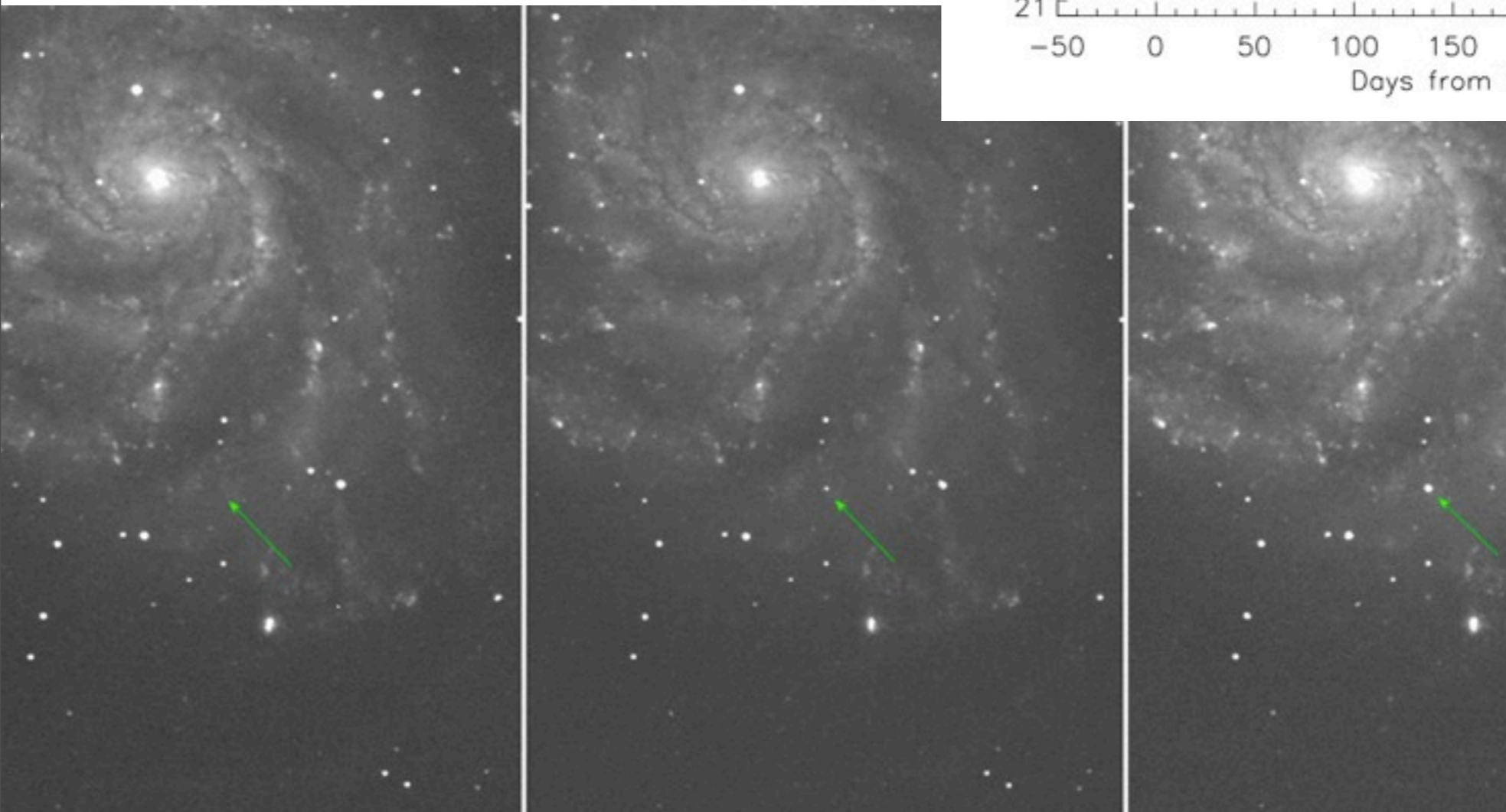
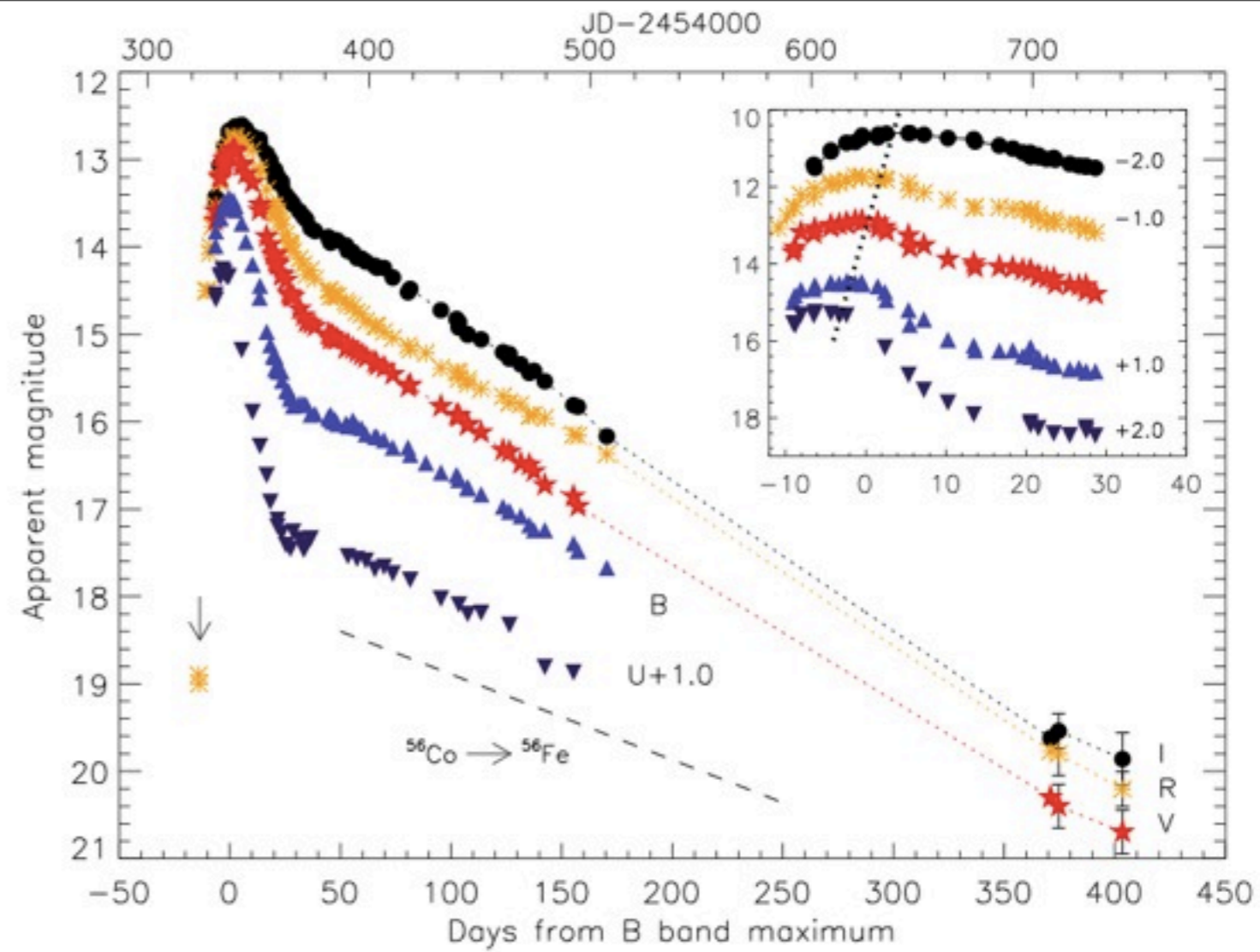
- On a alors des conditions de températures et de pression extrêmes. Les e^- qui aidaient à la pression sont capturés (par les éléments lourds ou par des protons)
- le coeur s'effondre soudainement

En ~ 1 seconde, un volume de la taille de la Terre se retrouve comprimé à un rayon de 50km!

- Si la masse initiale n'est pas trop grande ($< 25M_{\odot}$), le reste de coeur interne va se stabiliser (pression des neutrons) et devient une **étoile à neutron**
- Si la masse était importante, l'effondrement est total, produisant un **trou noir**
- Dans les deux cas: grande source de neutrinos

- **Ondes de choc** se propageant vers l'extérieur (dus à la force forte qui devient répulsive, les atomes "rebondissent")
- **Ejection de l'enveloppe** de l'étoile
 - quand la matière devient optiquement mince, l'énergie est relachée sous forme de photons, ce qui peut être aussi lumineux qu'une galaxie
- c'est le mécanisme des **Supernovae à effondrement de coeur**
 - SN de type II, de type Ib (perte de l'enveloppe d'H) ou de type Ic (perte de l'enveloppe d'H+He)
 - (Les SNe de type Ia - SNe thermonucléaires- impliquent une naine blanche dans un système binaire serré)

- Observations:
- augmentation rapide de luminosité
- mag limite de -18
- décroissance de 6-8 mag/an



- Les SN visibles à l'oeil nu sont rares:

- SN 1006

- SN 1054 (Crabe)

- SN 1572
détectée par Tycho

- SN 1604
détectée par Kepler

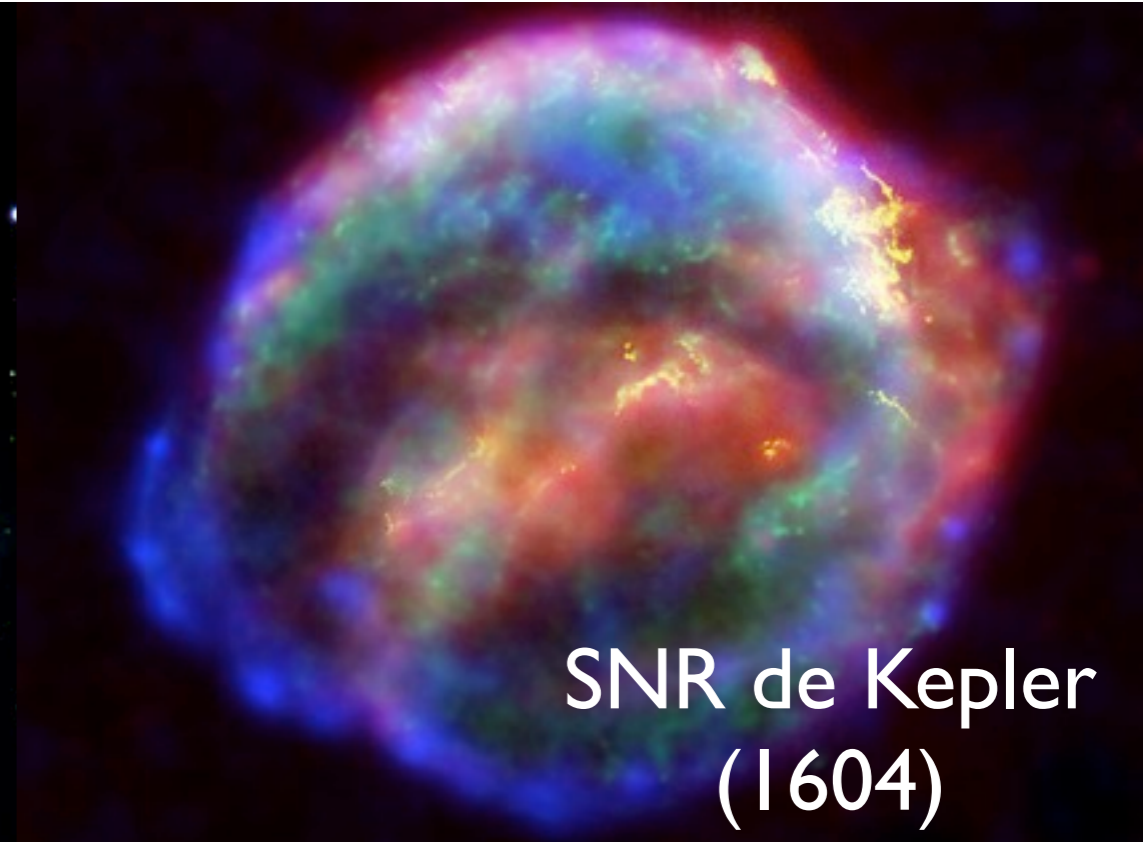
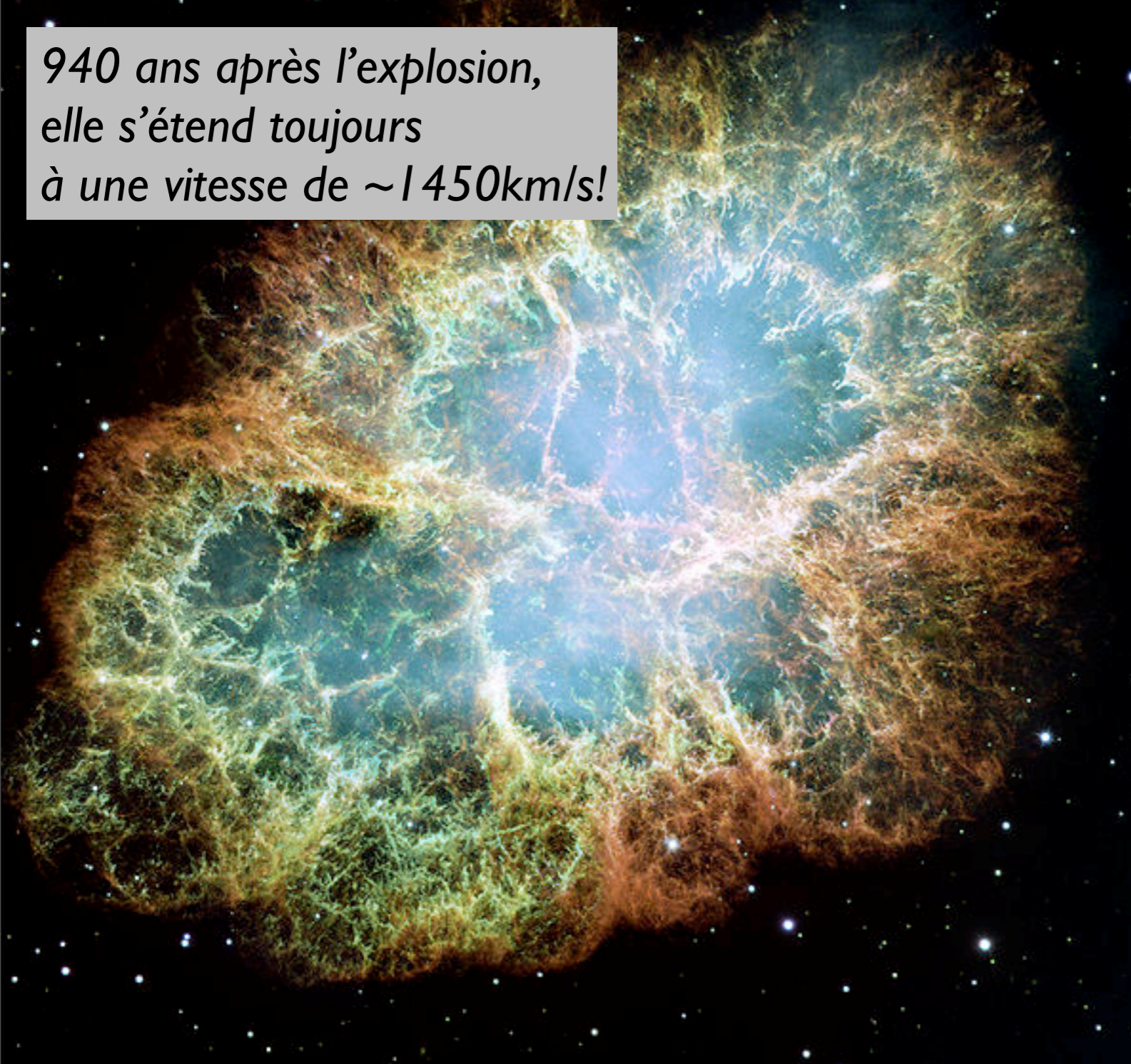
- SN 1987A
dans le LMC



Restes de supernova (SNR)

Nébuleuse du crabe: reste de SN 1054

*940 ans après l'explosion,
elle s'étend toujours
à une vitesse de $\sim 1450\text{km/s}$!*



SNR de Kepler
(1604)

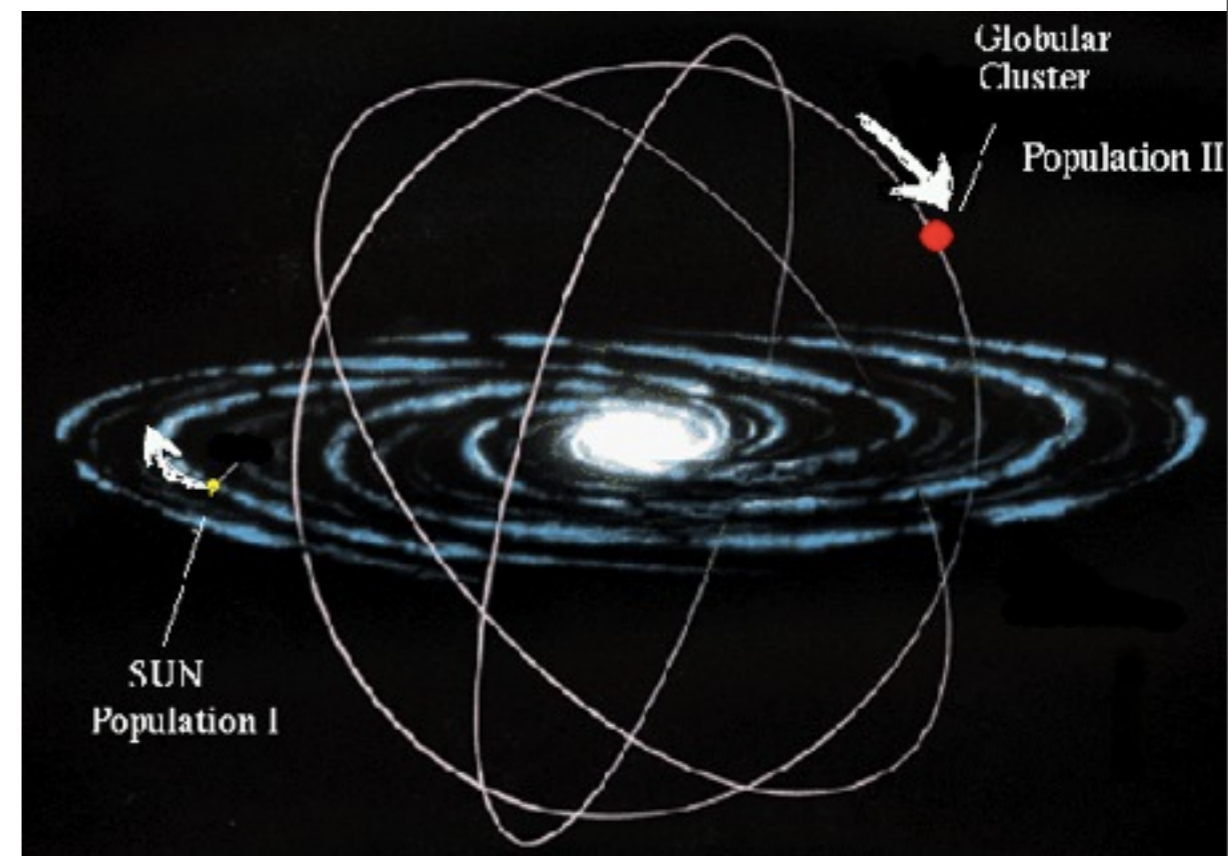


SNR de Tycho
(1572)

Les amas d'étoiles

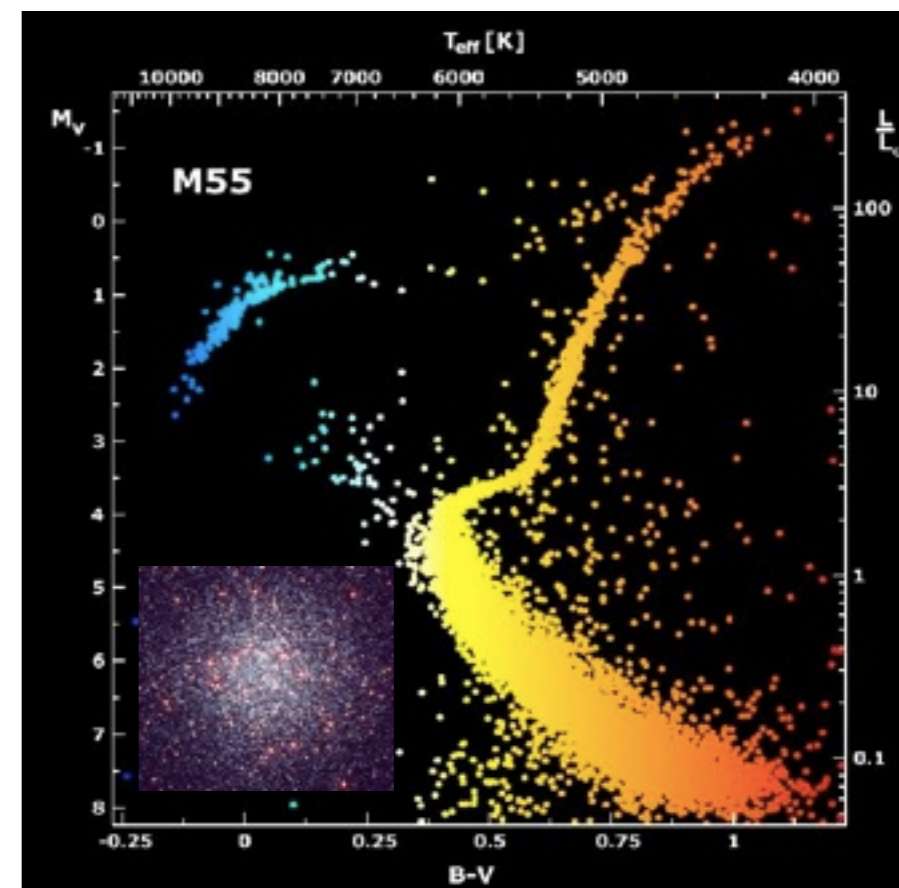
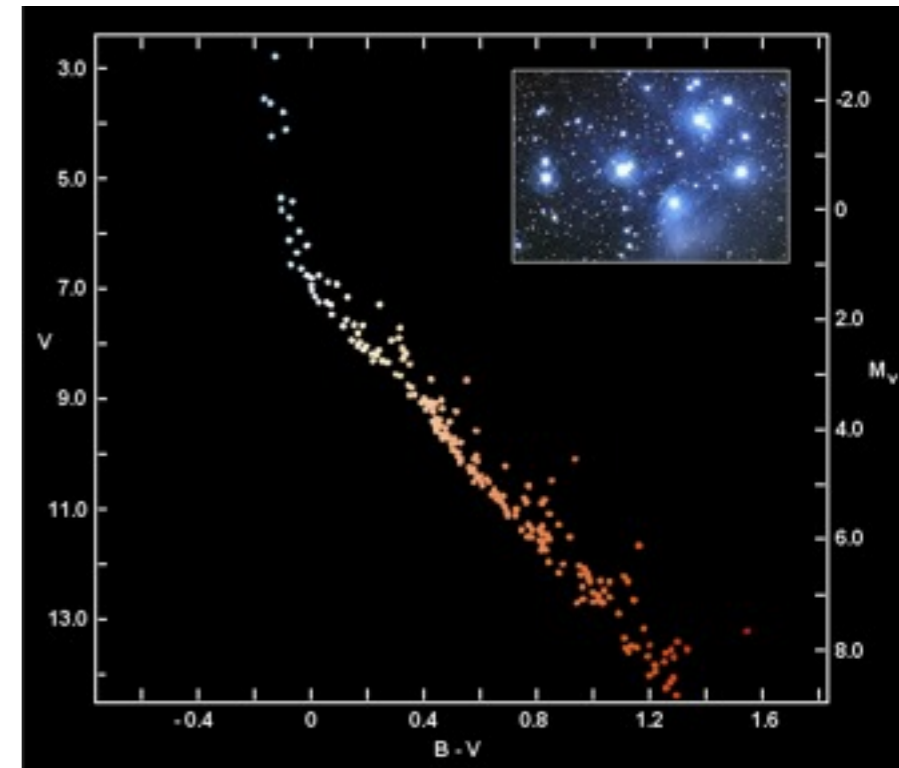
Populations d'étoiles

- Au départ: H et He. Enrichissement en métaux à chaque génération d'étoiles
- étoiles pauvres en métaux: **Population II**
- étoiles riches en métaux: **Population I**
- Les étoiles de **population III** sont une population hypothétique d'étoiles aujourd'hui éteintes, quasiment sans métaux, déduites de la cosmologie



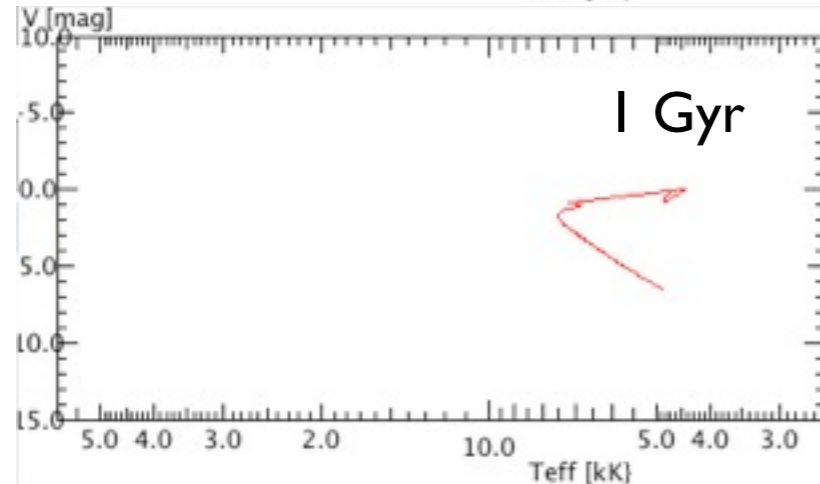
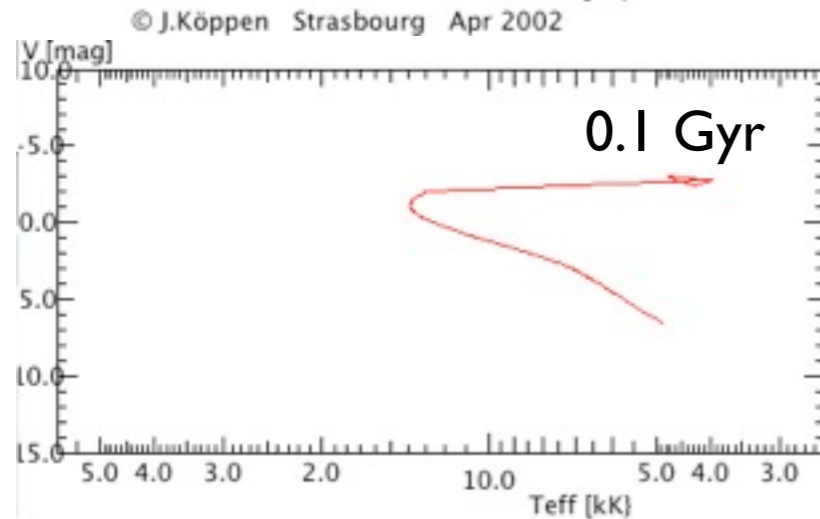
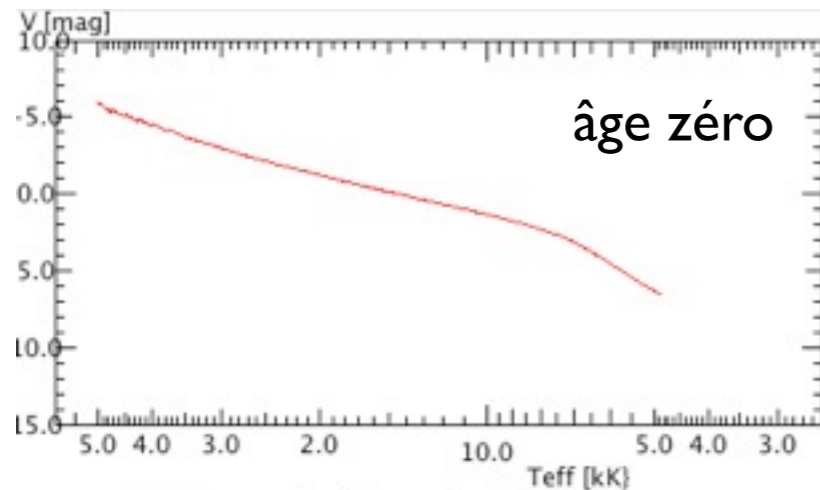
Etoiles d'un amas

- Effondrement d'un nuage. Processus de fragmentation
→ création d'un amas d'étoiles
- Chaque étoile membre d'un amas vient du **même nuage**, a le **même âge** et la **même composition chimique**
- étoiles à la même distance → on peut utiliser la *magnitude apparente* pour construire un diagramme HR
- Ajustement d'un modèle sur la séquence principale → distance par **“Main-sequence fitting”**



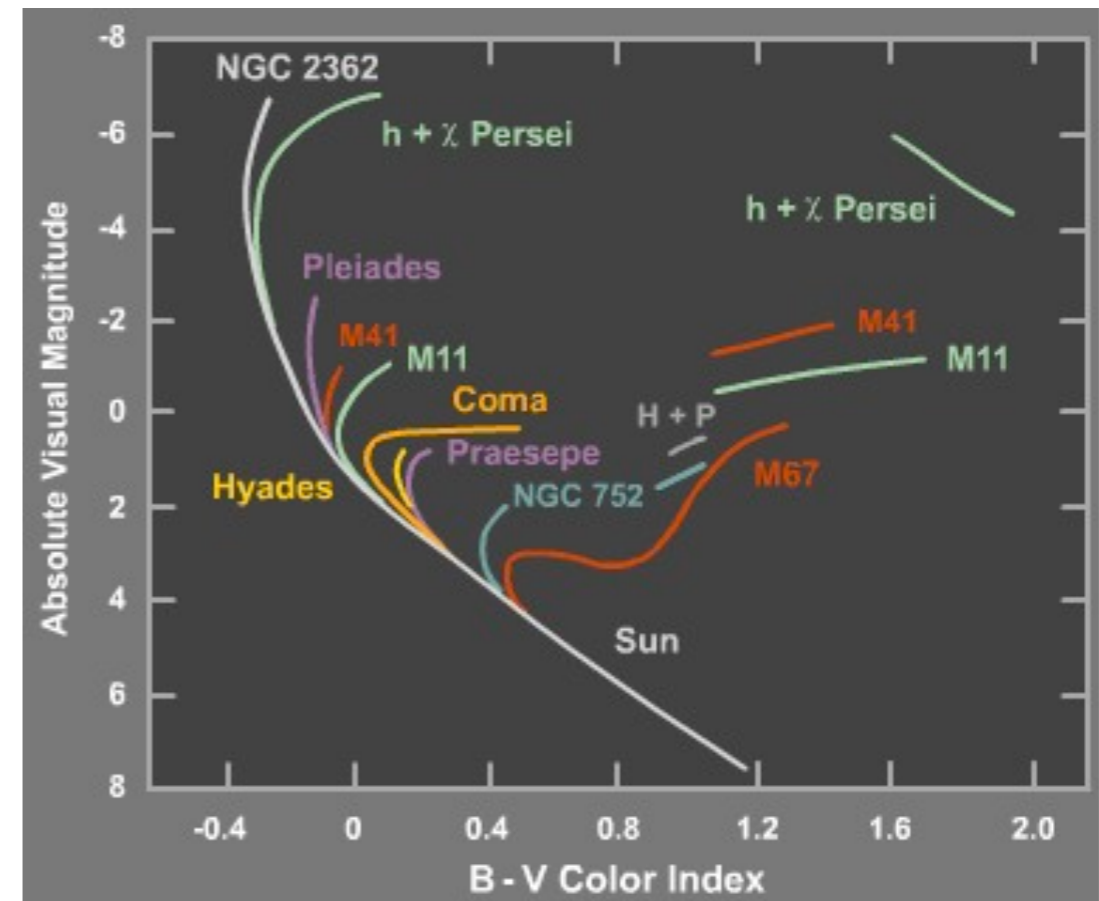
Age des amas

Isochrones



...

- “Main sequence turn-off”
- c’est le point où les étoiles quittent la séquence principale
- devient plus rouge et moins lumineux avec le temps



crédit: e-education.psu.edu

Bilan

- La réussite de la comparaison entre théorie et observations dans les amas montre que notre représentation de l'évolution stellaire est assez complète
- Nombreux succès des théories d'évolution stellaire: explications des abondances observées, compréhension des différents types d'étoiles en terme de masse et d'évolution dans le temps
- Il reste de la place pour beaucoup de "rafinements" (convection, rotation, champs magnétiques, ...) + quelques objets "bizarres" (étoiles WR, η Carinae, ...)

Ce cours a été en grande partie inspiré par le livre:

