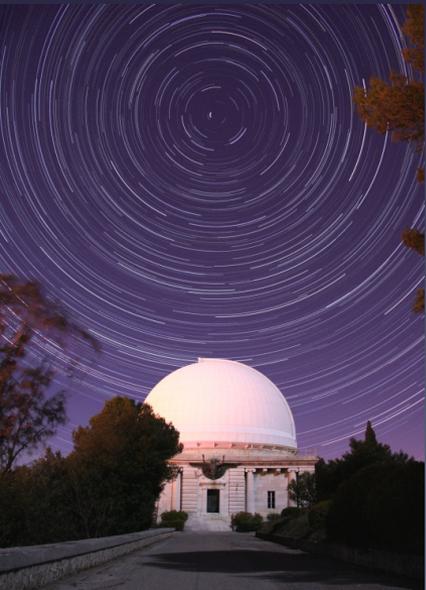


Les étoiles (2)

Eric Lagadec



Les amas stellaires

- La plupart des étoiles se forment dans des amas: groupes d'étoiles, même âge, même composition.
- Amas ouverts
- Amas globulaires

Les amas ouverts

- Dizaines/milliers d'étoiles, plan Galactique, durée de vie quelques millions/centaines de millions d'années



Les pléiades

Les amas globulaires

- Dizaines de milliers/millions d'étoiles, Halo Galactique, durée de vie milliards d'années



La vie des étoiles

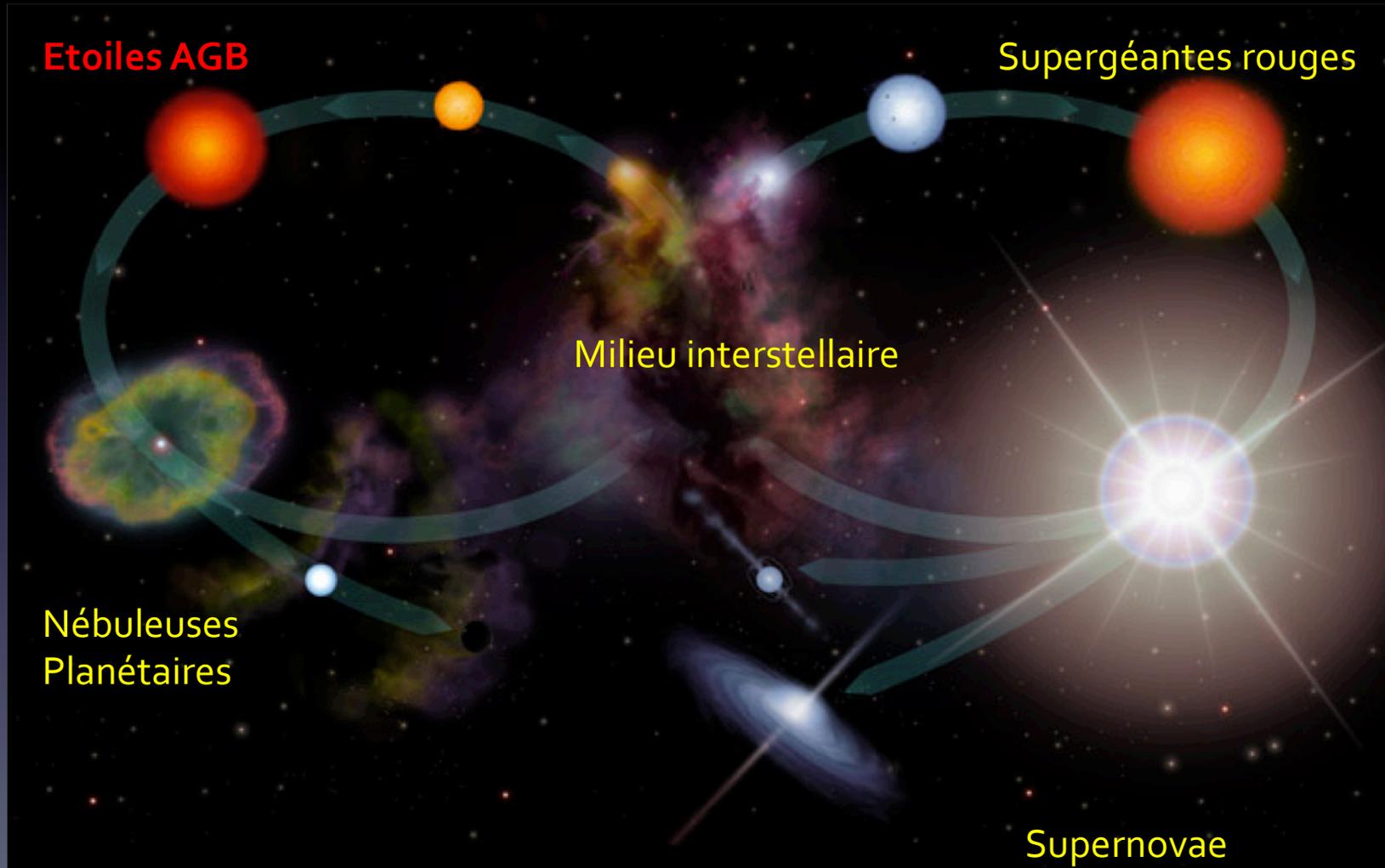
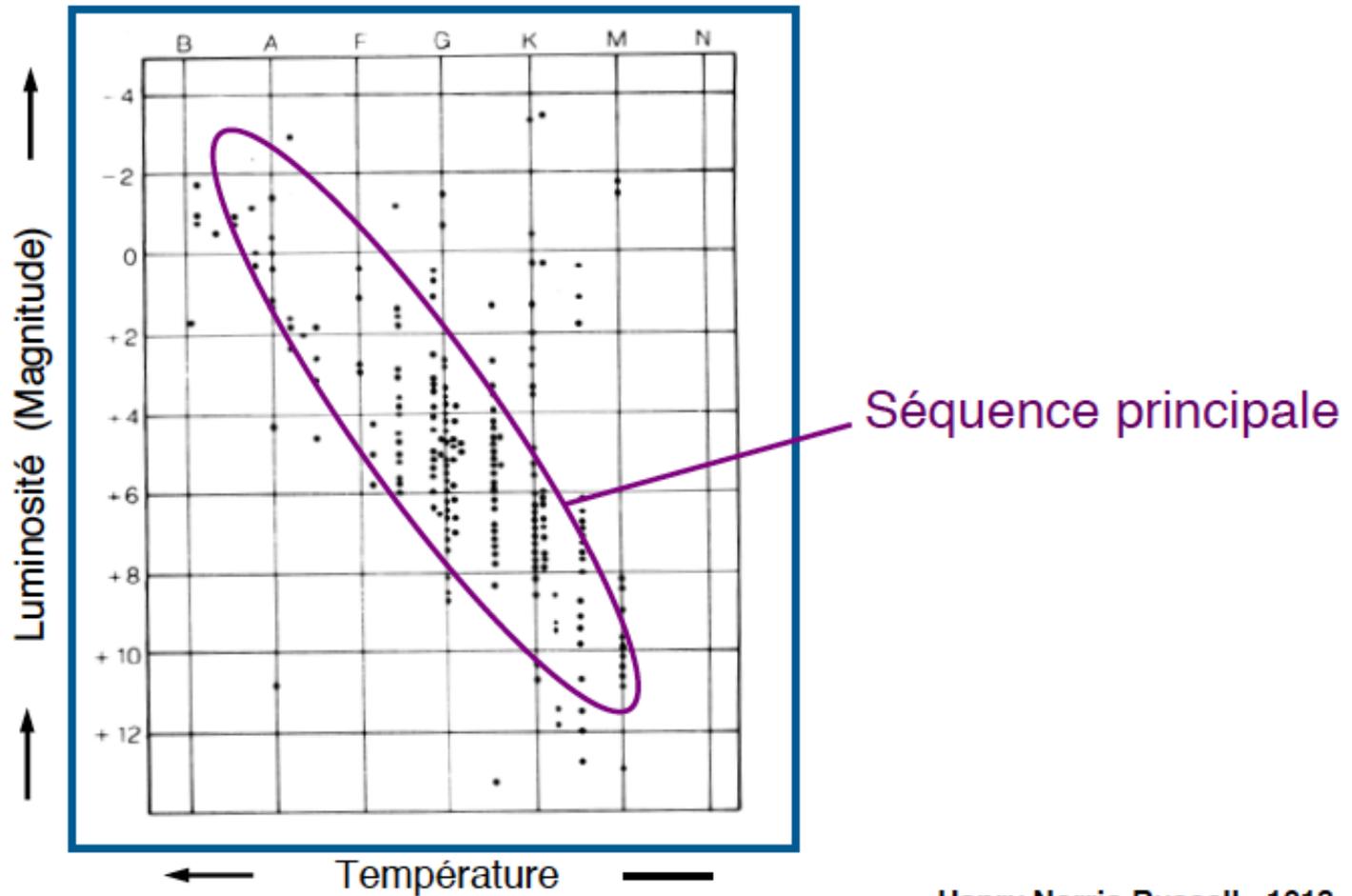


Diagramme Hertzsprung-Russell : Diagramme H-R



Henry Norris Russell - 1913

Diagramme H-R

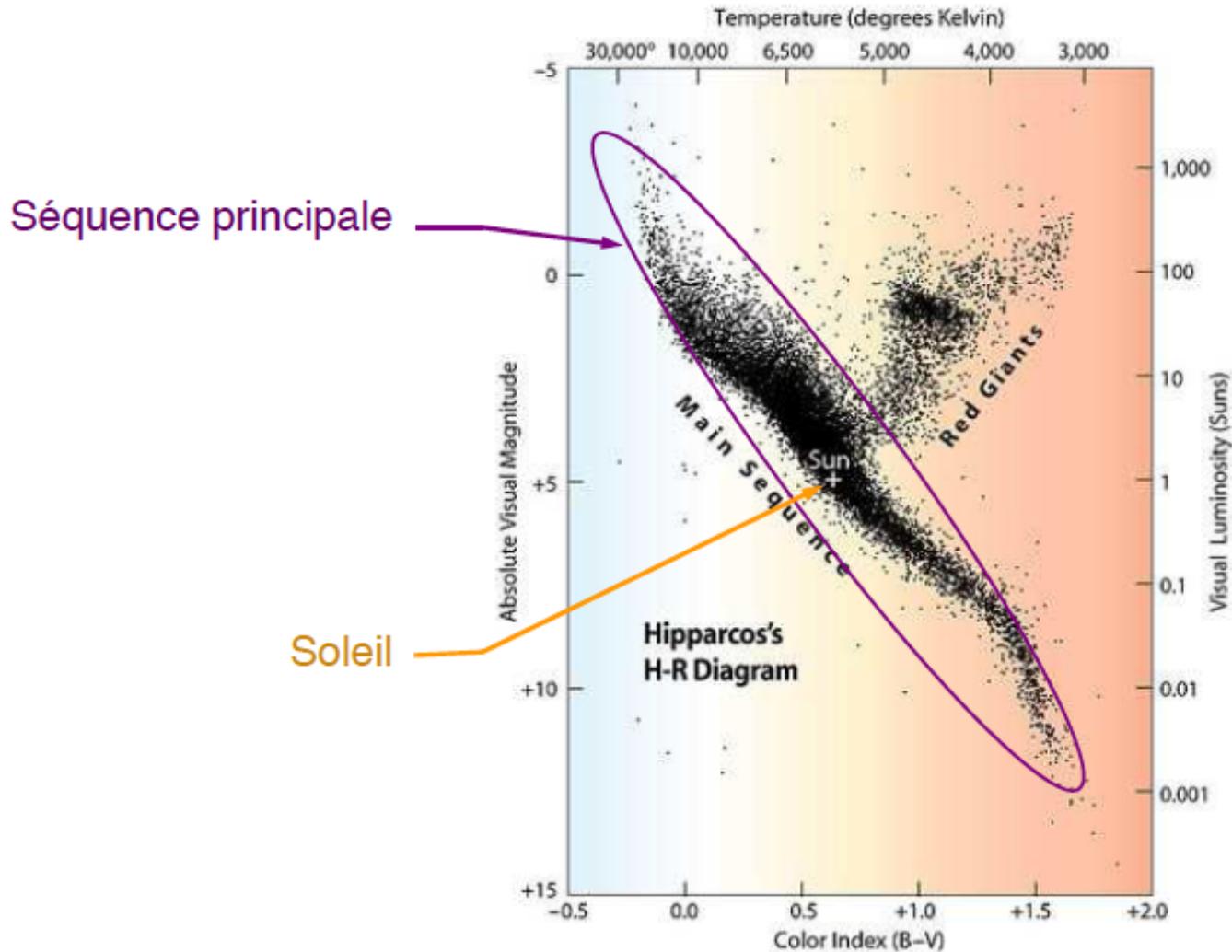
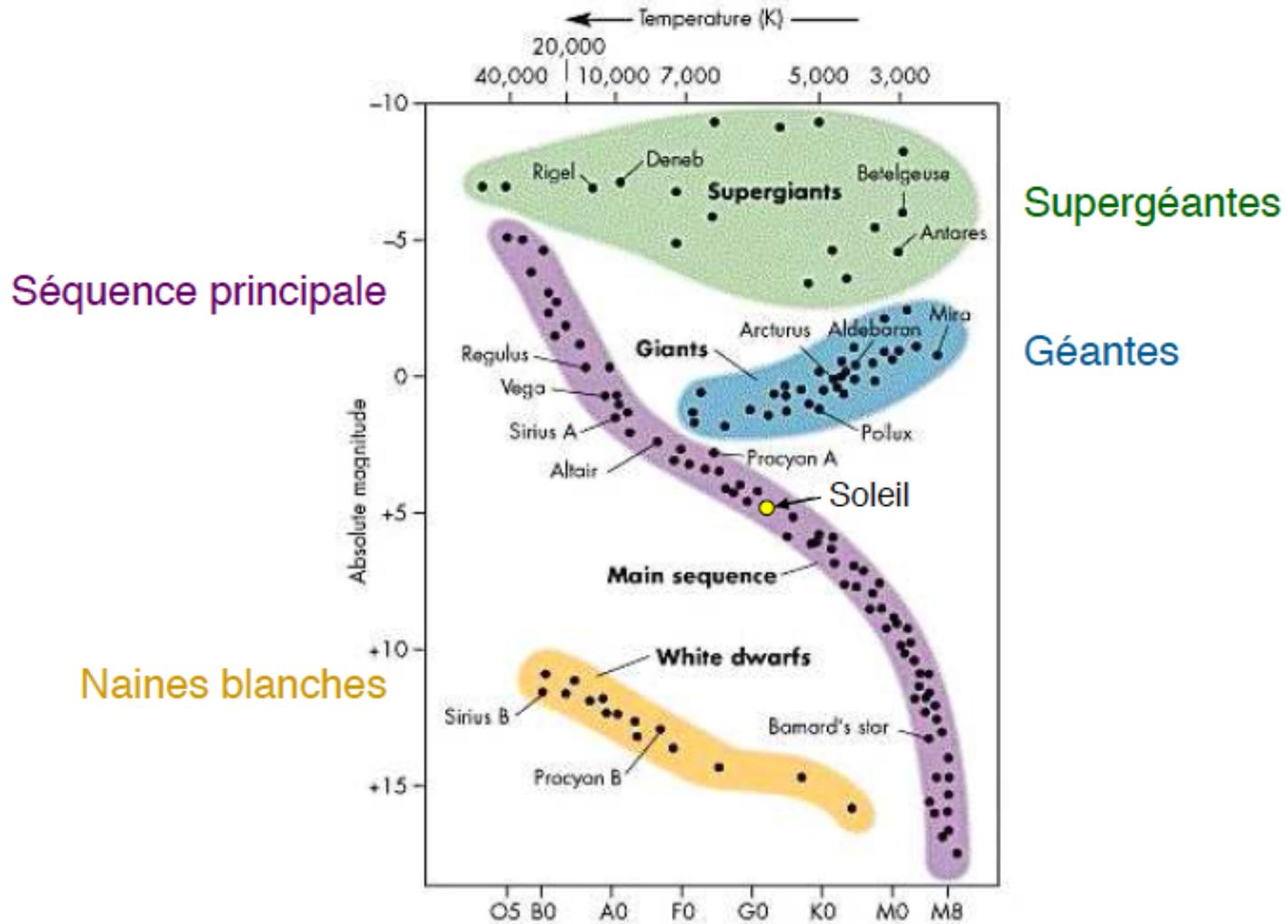
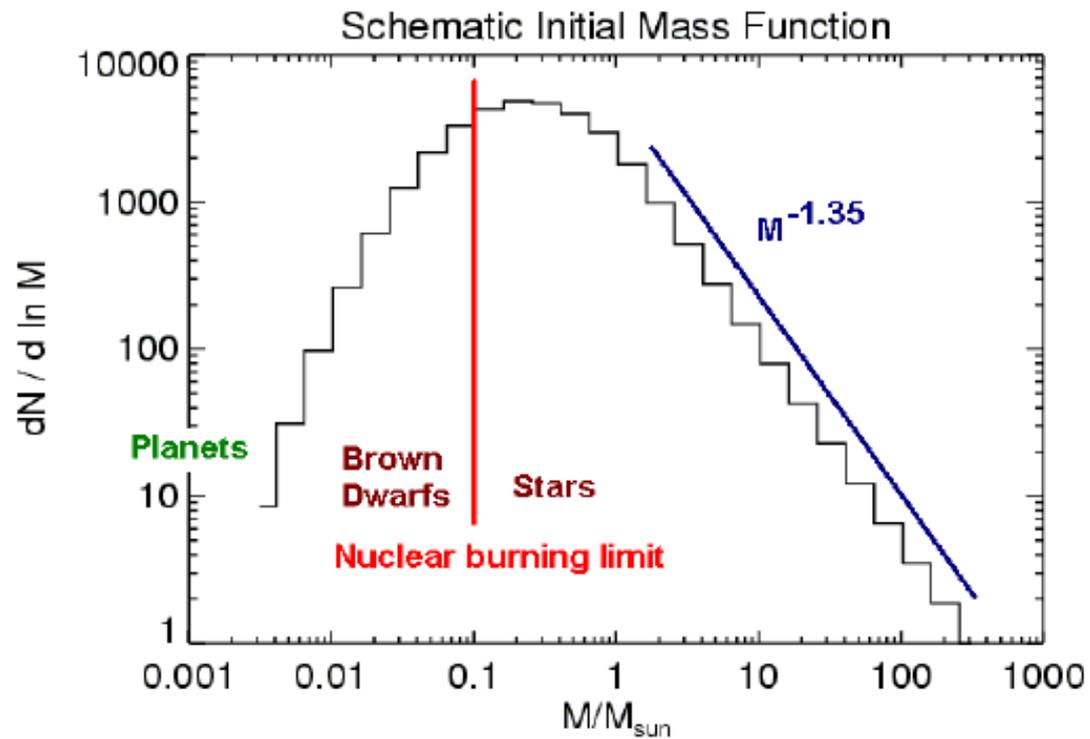


Diagramme H-R



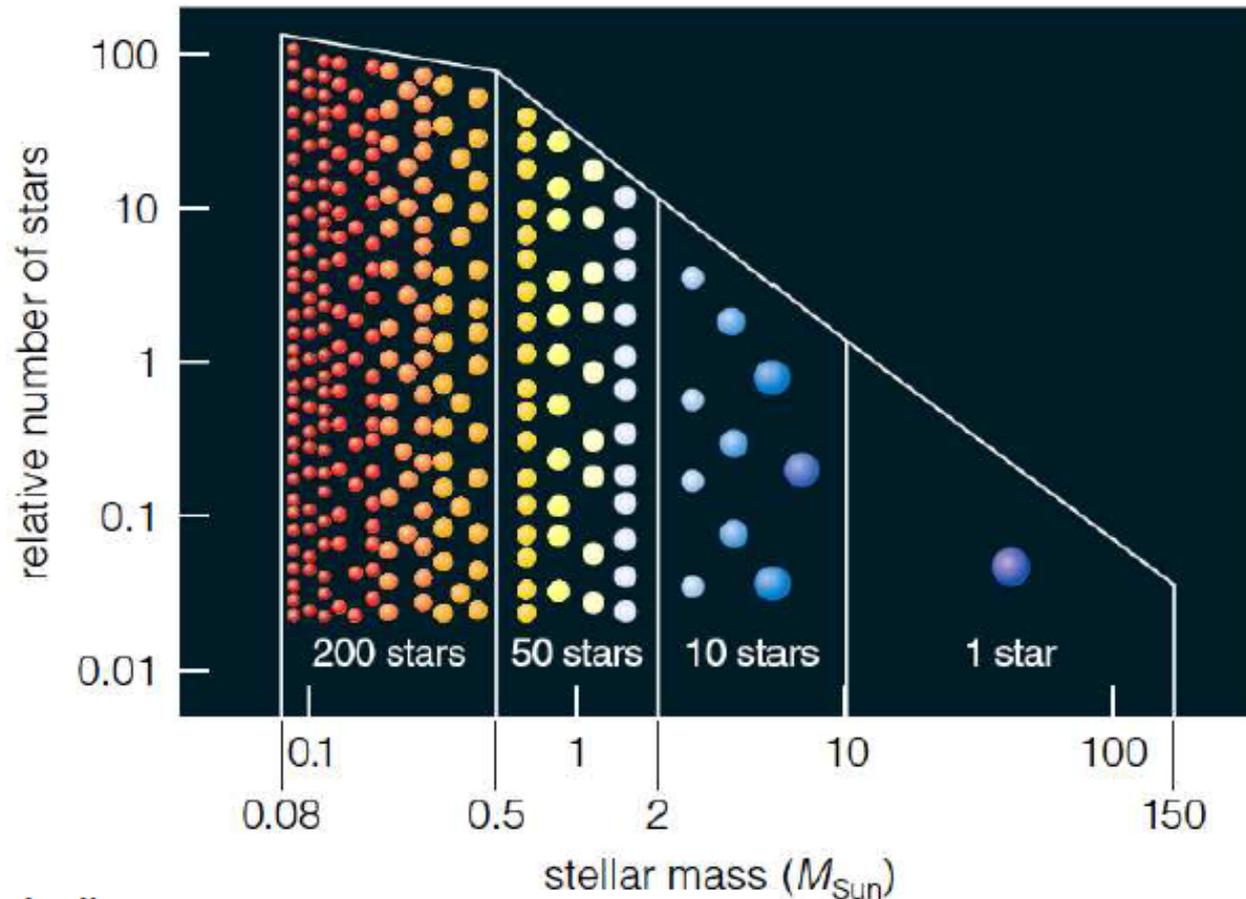
Fonction initiale de masse

Un nuage moléculaire peut donner naissance à un millier d'étoiles. Les étoiles de faible masse sont plus nombreuses que les étoiles massives.



Loi de distribution de masse pour une population d'étoiles nouvellement formées

Masses typiques des étoiles nouvellement formées



261 étoiles

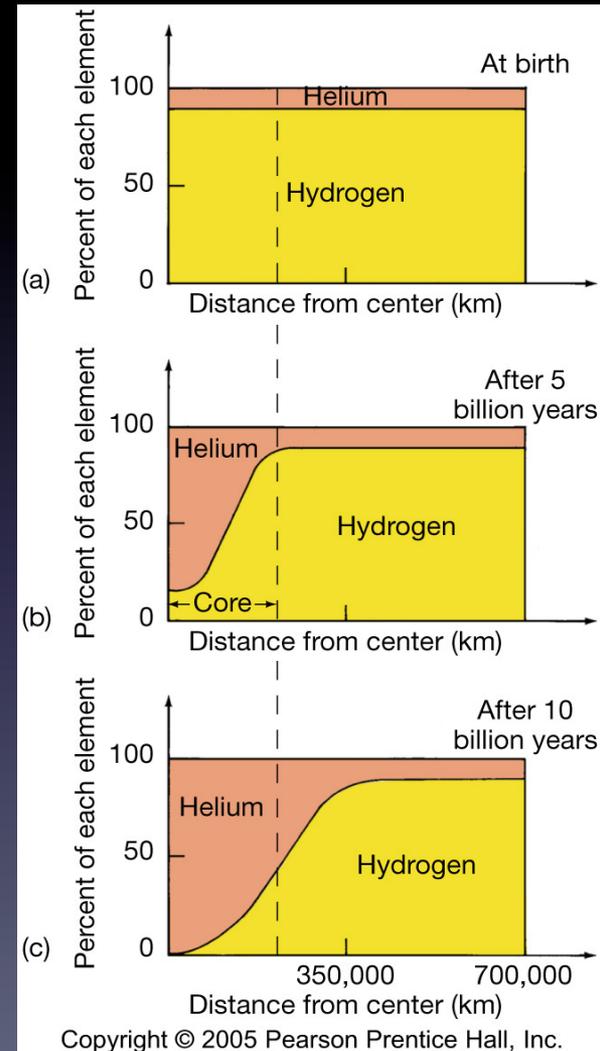
32 étoiles [12%] plus massives que le soleil, 229 [88%] moins massives que le Soleil

La séquence principale

- Fusion de l'hydrogène en hélium
- Plus longue période de l'évolution stellaire (90%)
- Plus une étoile est massive, moins elle vit longtemps (plus grande pression, température et donc efficacité des réactions nucléaires)

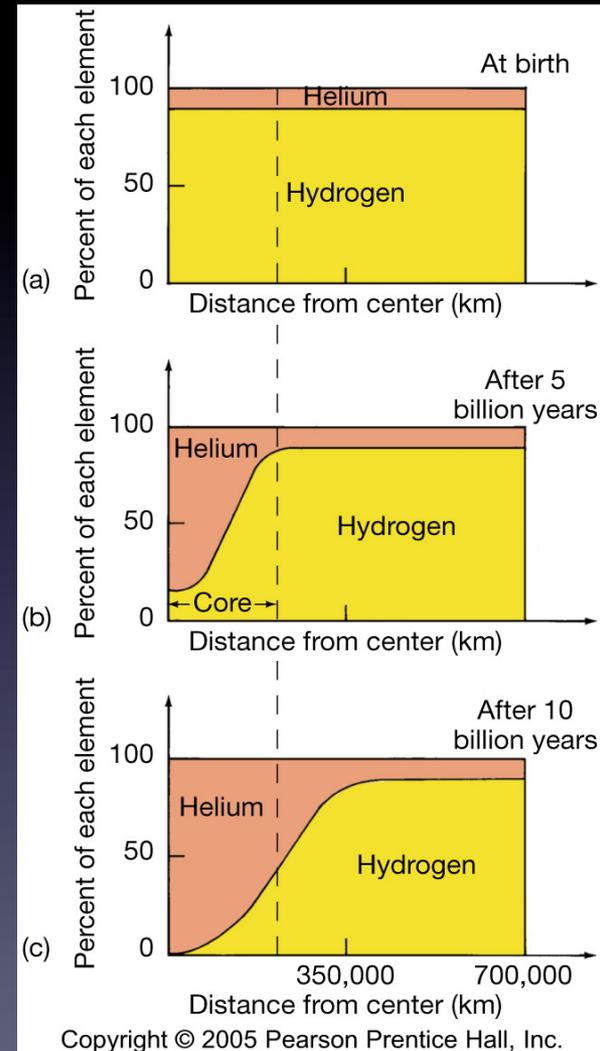
Evolution d'une étoile de type solaire

- Même sur la séquence principale, la composition du cœur change

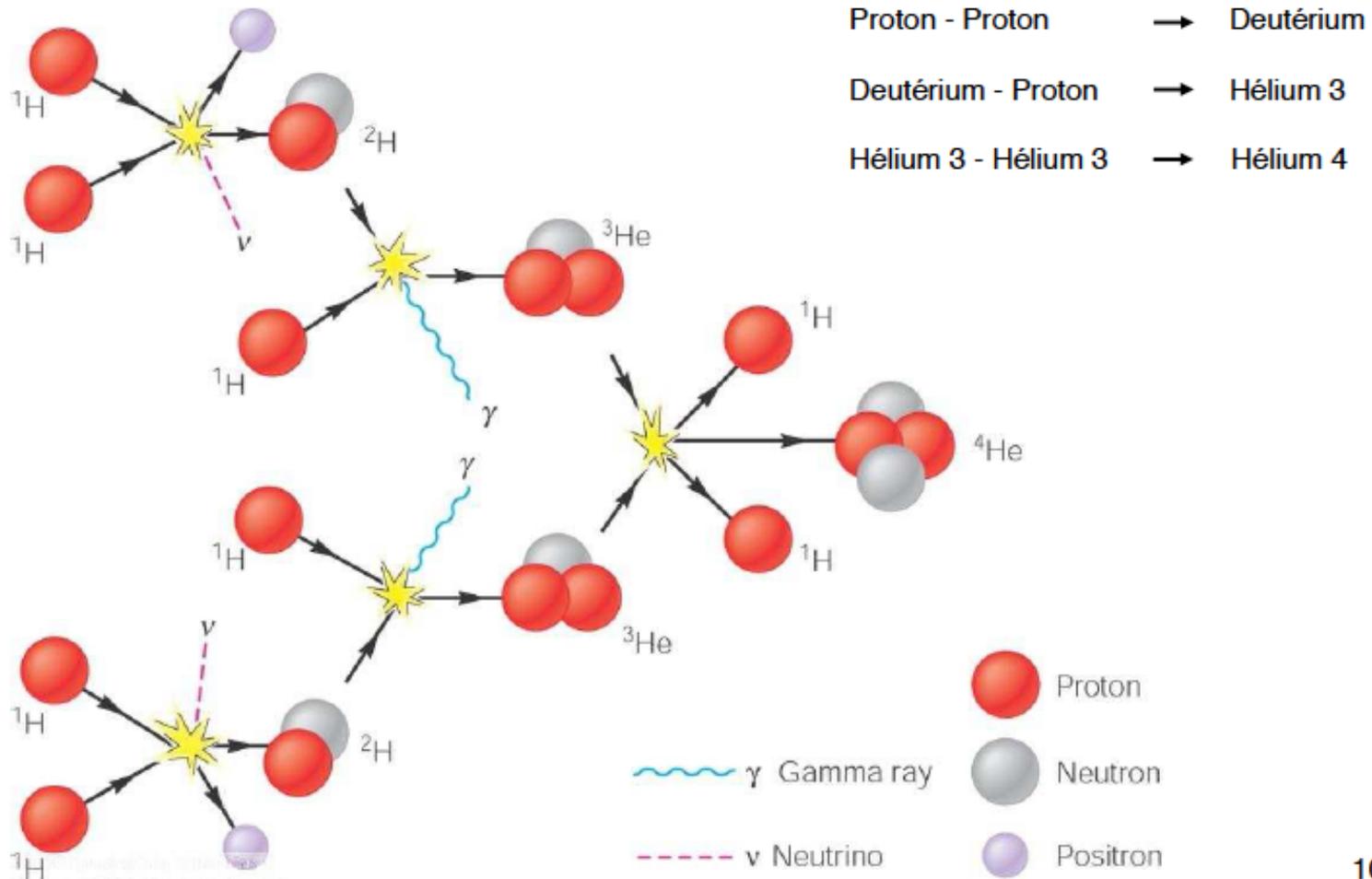


Evolution d'une étoile de type solaire

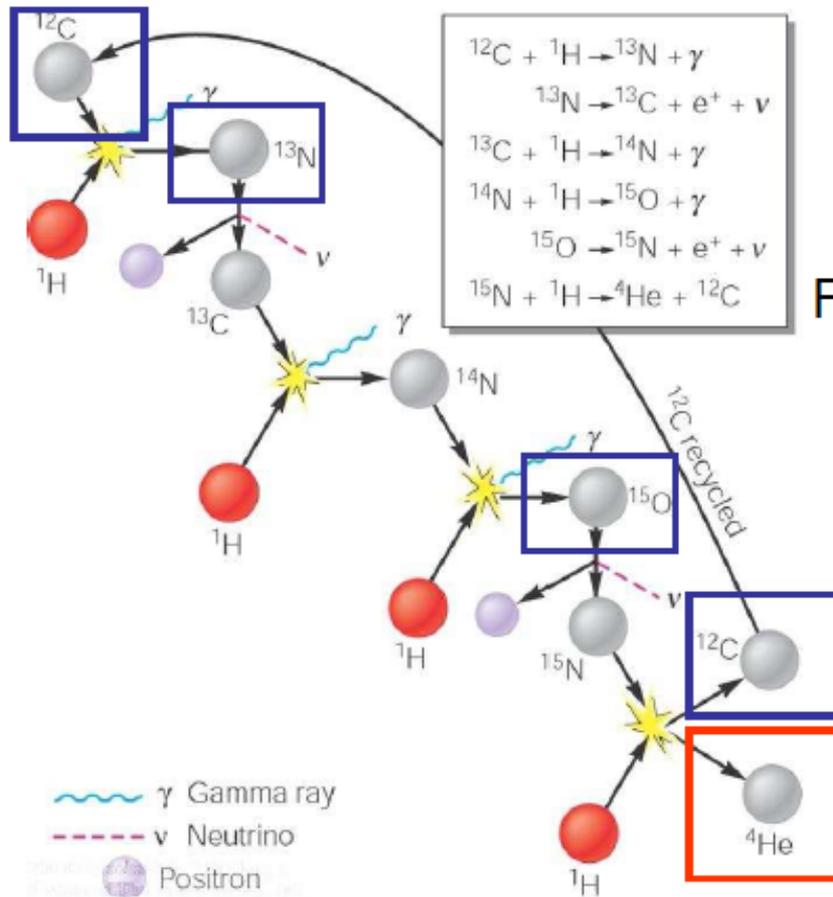
- Même sur la séquence principale, la composition du cœur change



Chaîne Proton-Proton [P-P]: Etoiles de masse solaire



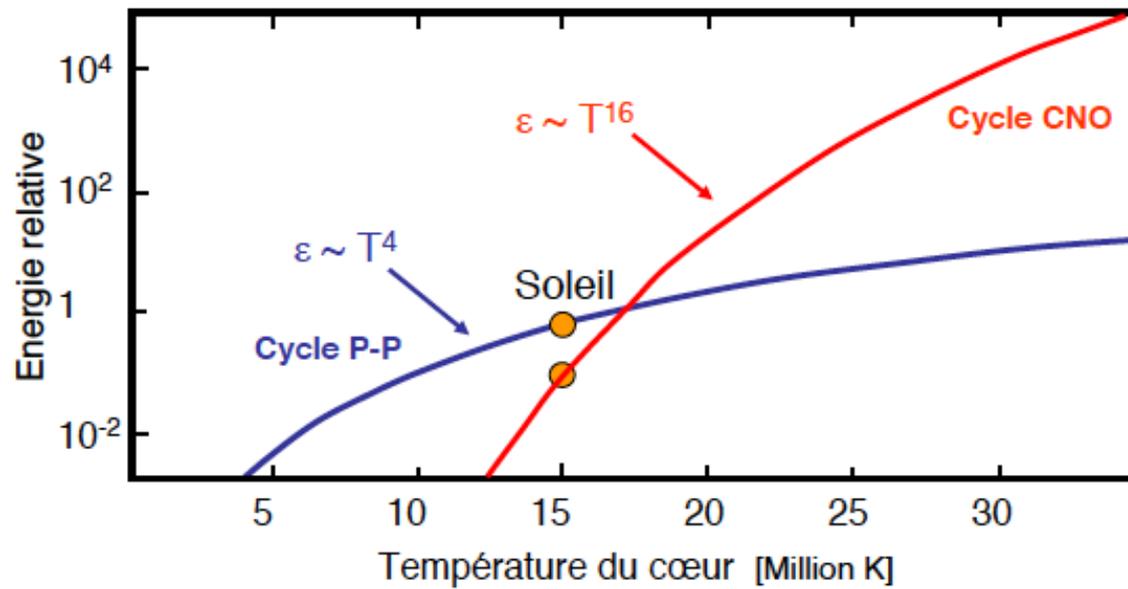
Chaîne CNO (Carbone Azote Oxygène): Etoiles plus massives que le Soleil



Fusion de 4 noyaux d'hydrogène en un noyau d'hélium

Le Carbone sert de catalyseur. Il est régénéré à la fin du cycle

P-P ou CNO



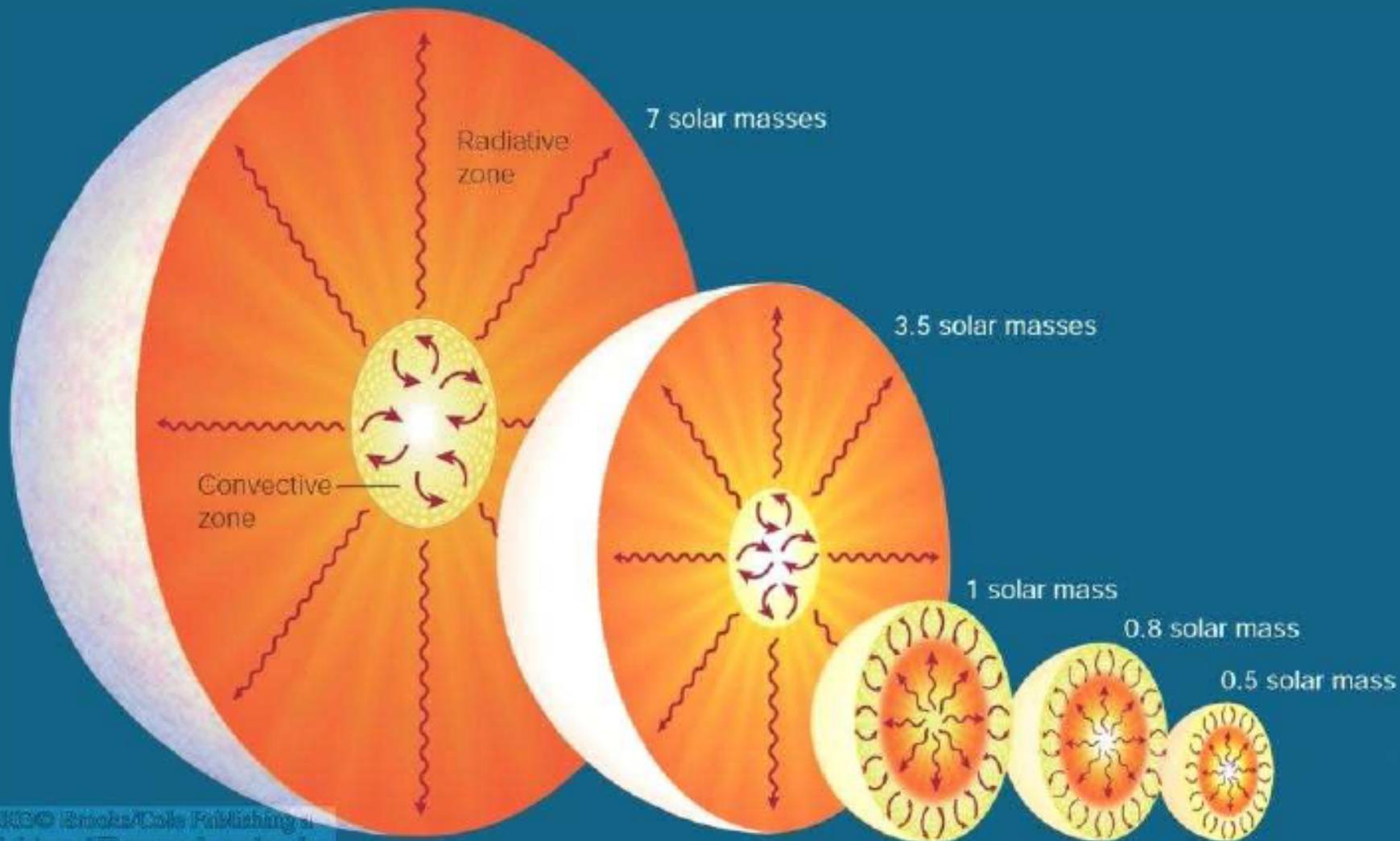
Transport d'énergie

Cycle CNO

Cœur convectif – enveloppe radiative

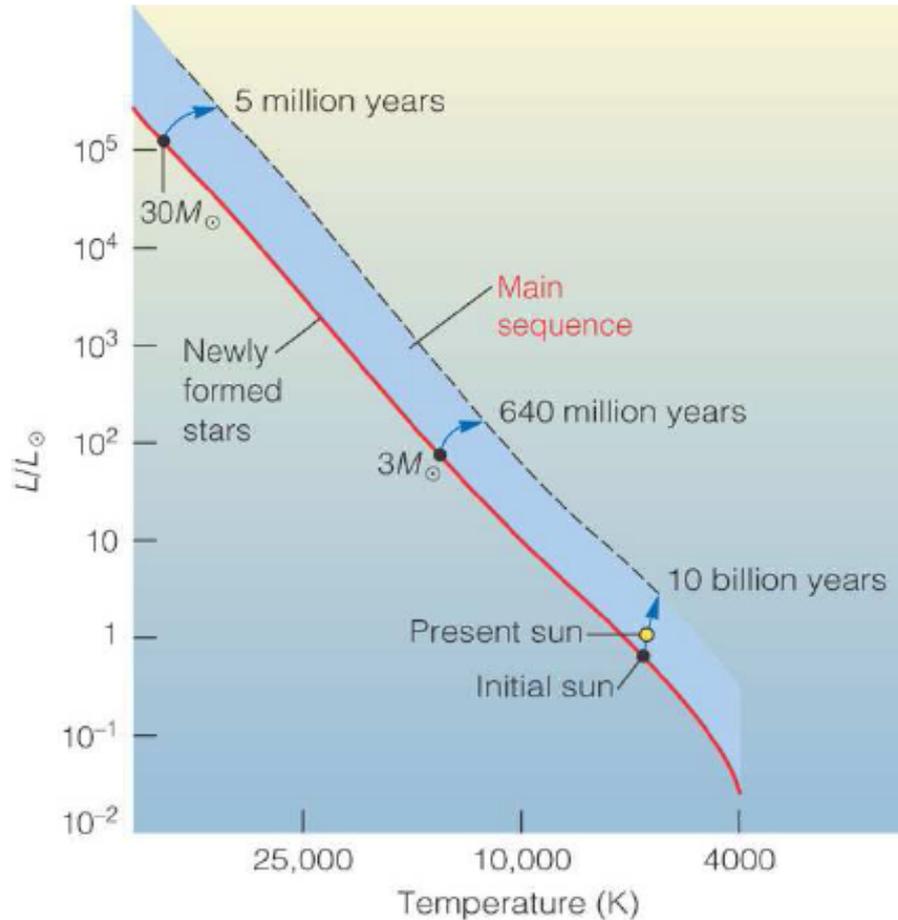
Cycle P-P

Cœur radiatif – enveloppe convective



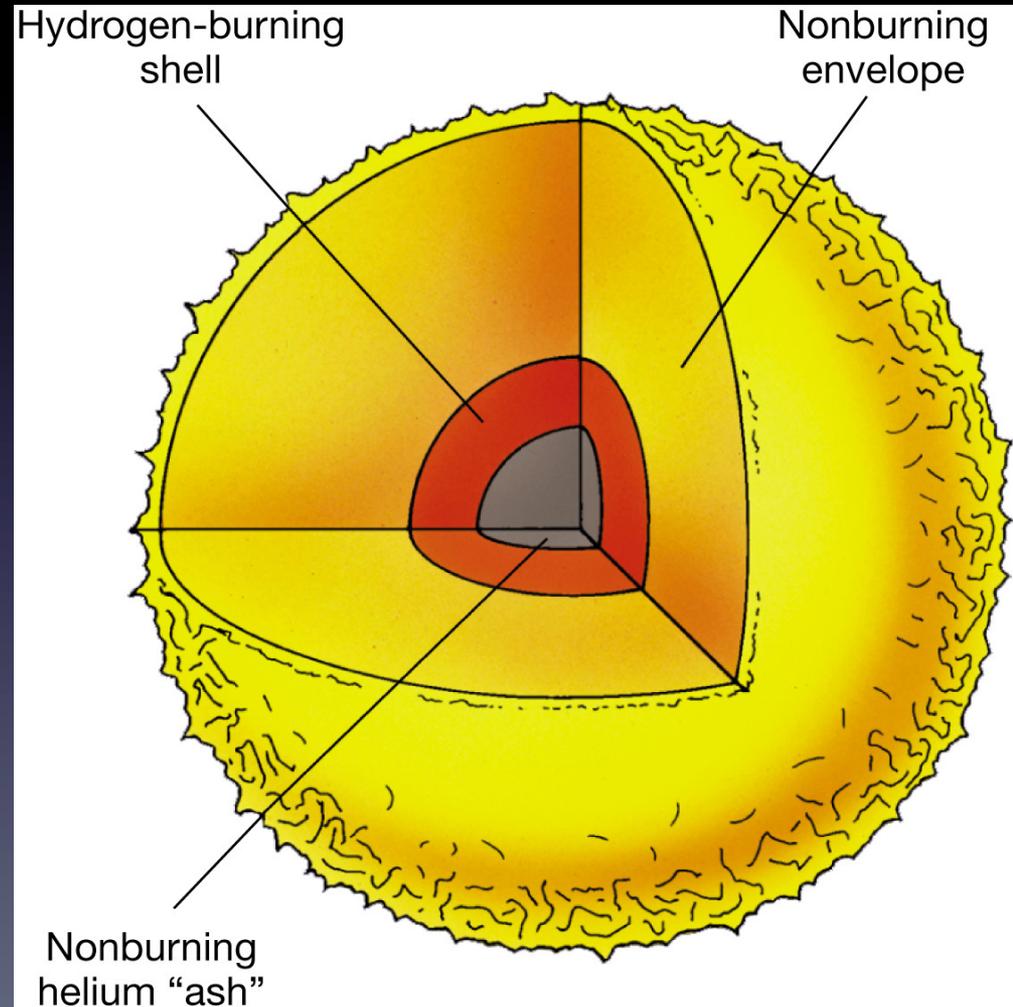
Séquence principale : 90% de la vie de l'étoile

L'évolution est rapide pour les étoiles massives



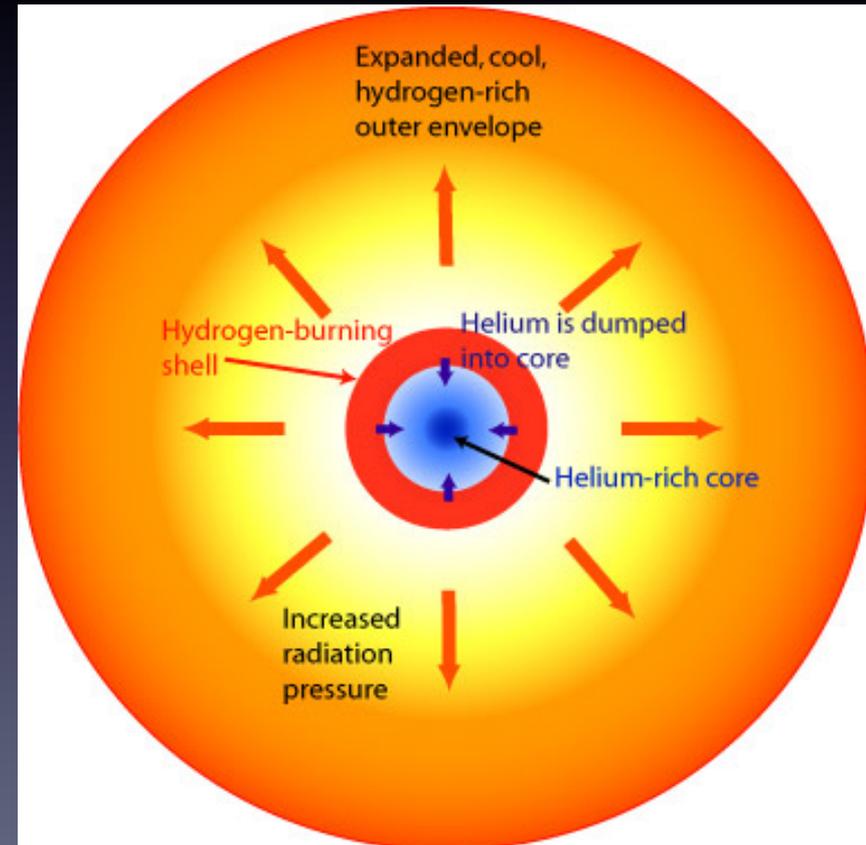
Evolution d'une étoile de type solaire

- Quand l'étoile a brûlé son hydrogène, le cœur se contracte et la fusion de l'hydrogène a lieu en dehors du cœur



Evolution d'une étoile de type solaire

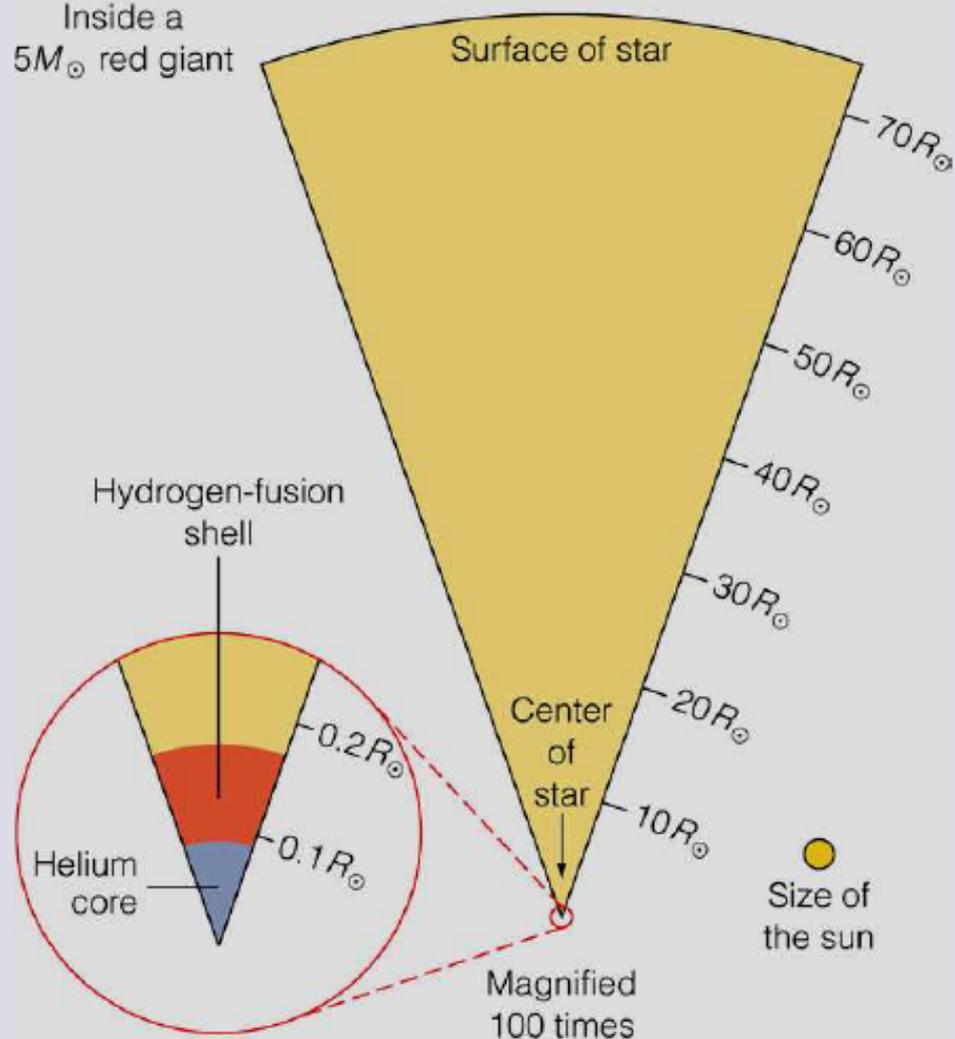
- Alors que le coeur se contracte, son enveloppe s'agrandit et refroidit.
- C'est maintenant une Géante Rouge (froide, mais très lumineuse)
- Dredge-up



Hydrogen Shell Burning on the Red Giant Branch

Géante rouge

Inside a
 $5M_{\odot}$ red giant



Aldebaran [α Tauri]

$d = 20$ pc [65 al]

$L = 150 L_{\odot}$

$D = 38 D_{\odot}$

Arcturus [α Bootis]

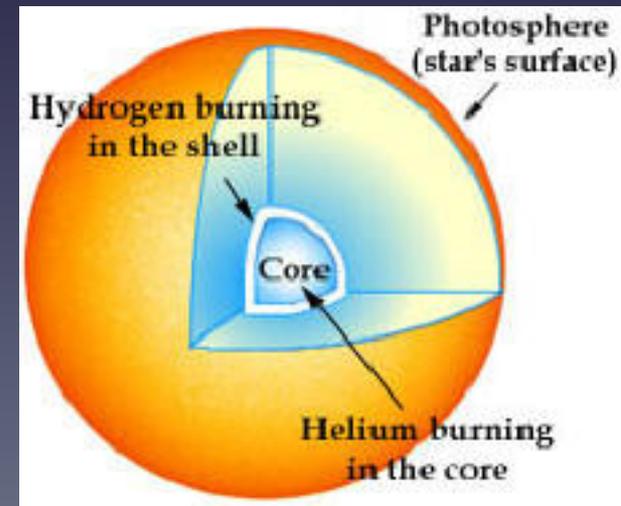
$d = 11.3$ pc [37 al]

$L = 110 L_{\odot}$

$D = 20 D_{\odot}$

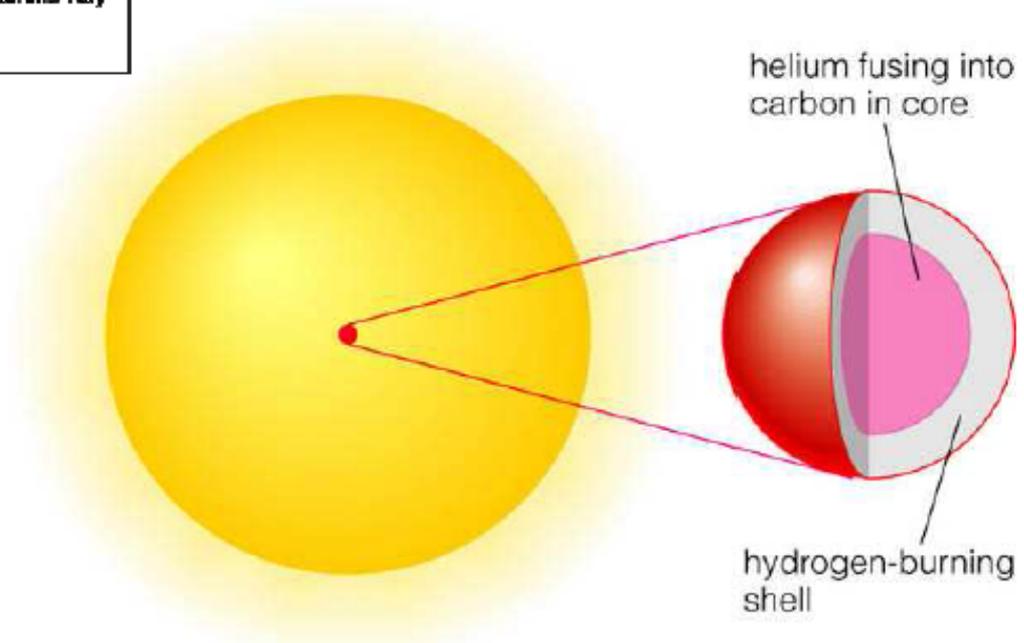
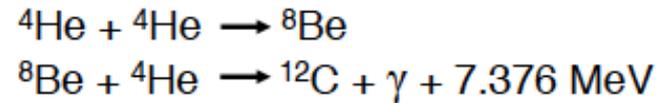
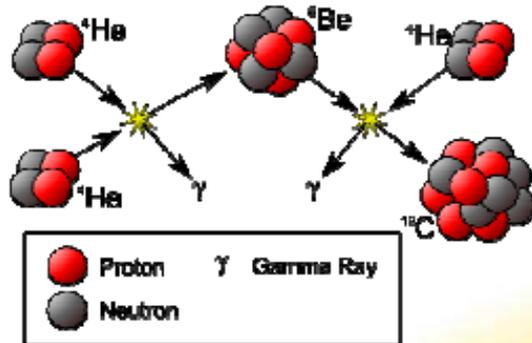
Evolution d'une étoile de type solaire

- Comme le coeur se contracte, il se réchauffe
- Vers 100 000 000K:
fusion de l'Hélium (Flash de l'Hélium) : carbone
- Branche Horizontale



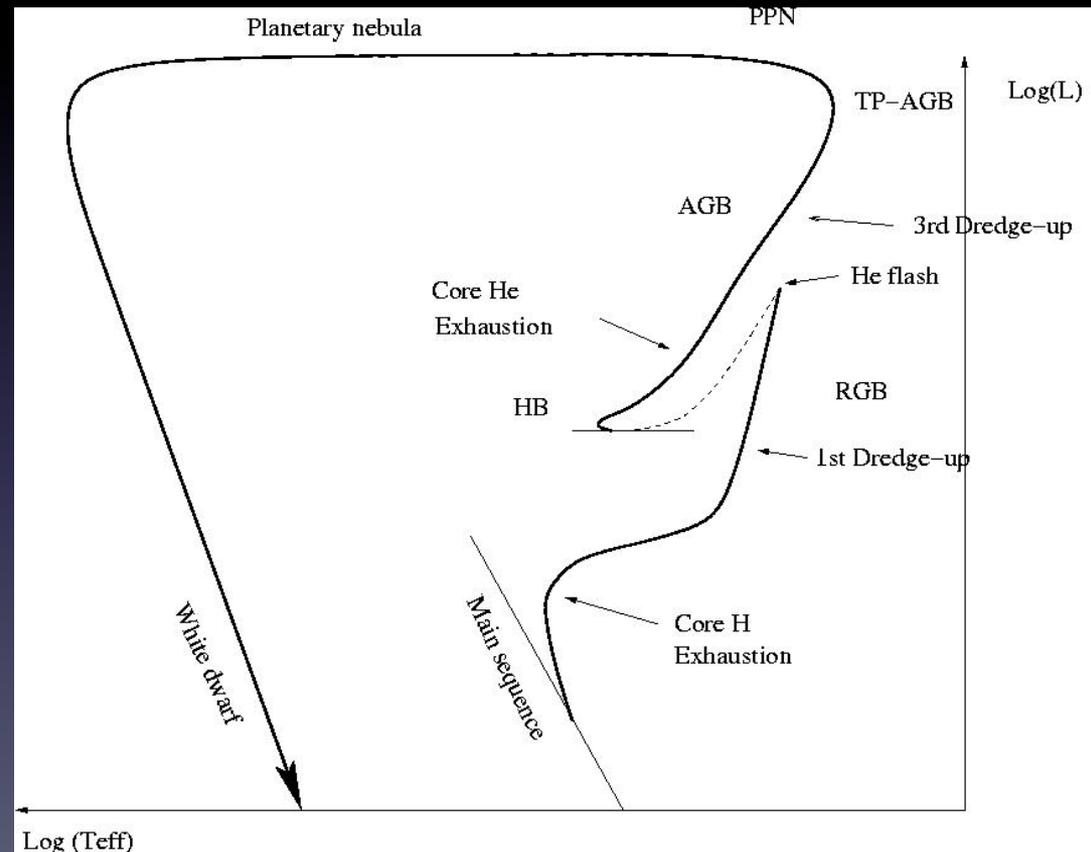
Evolution des étoiles de petites et moyennes masses

Fusion de l'hélium [T= 100 million K]

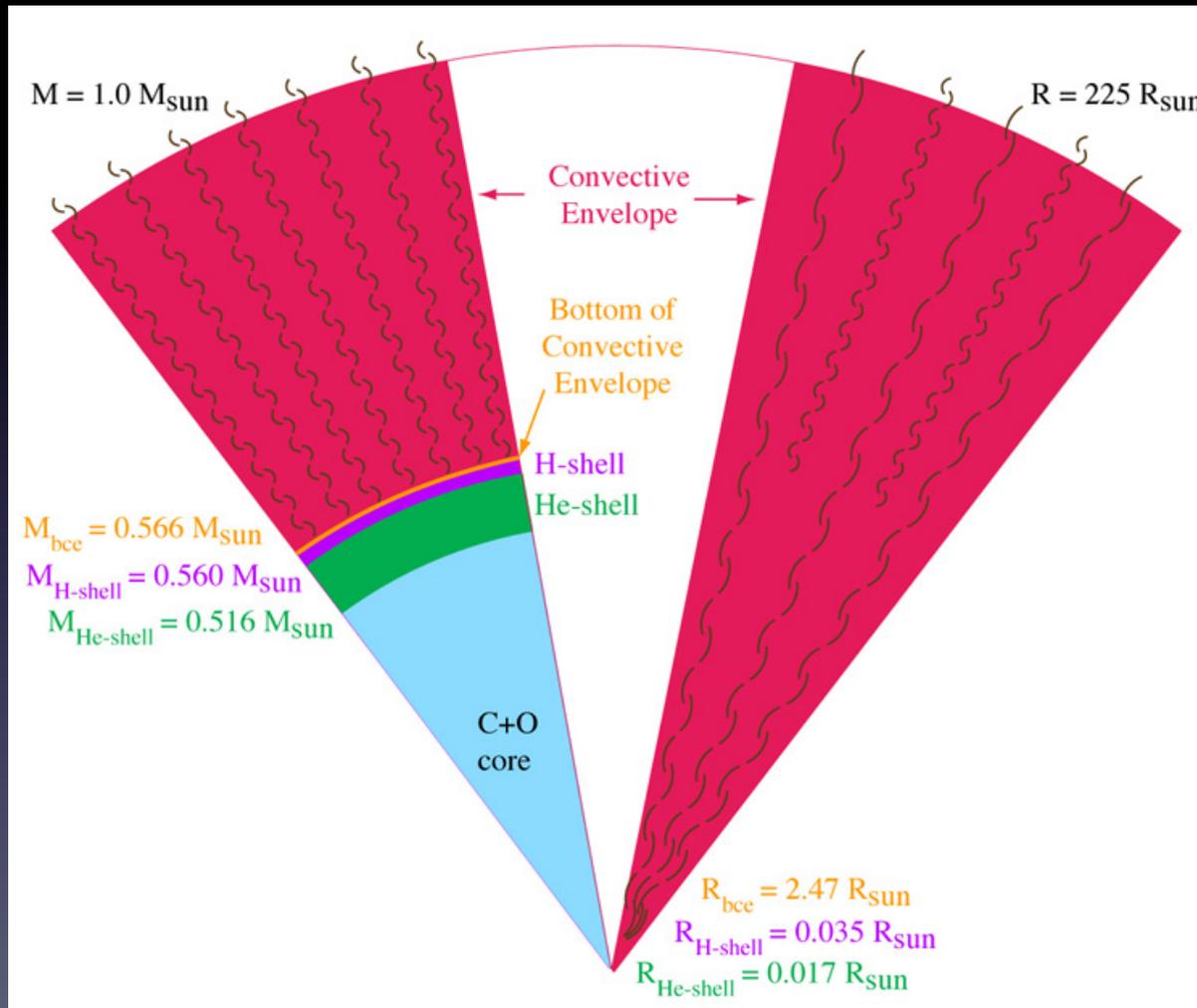


Evolution d'une étoile de type solaire

- Fin de la fusion de l'Hélium dans le cœur: l'étoile devient une géante pour la seconde fois: AGB (Asymptotic Giant Branch star)

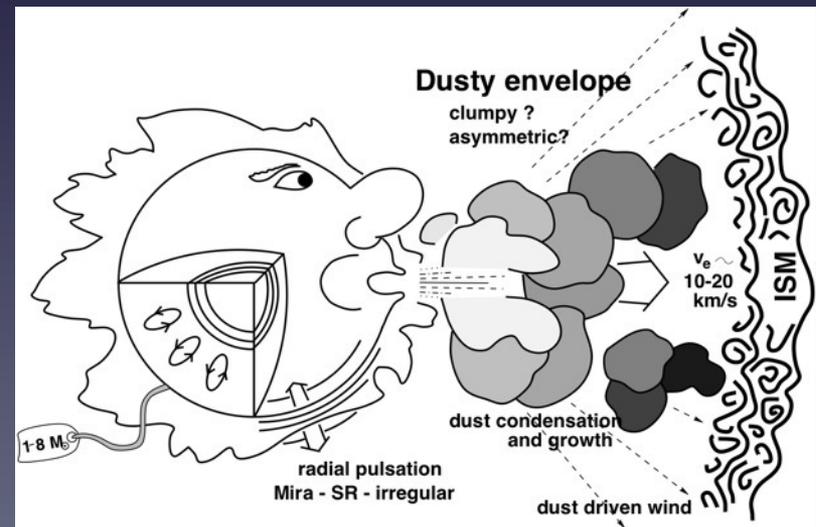


Structure d'une étoile AGB



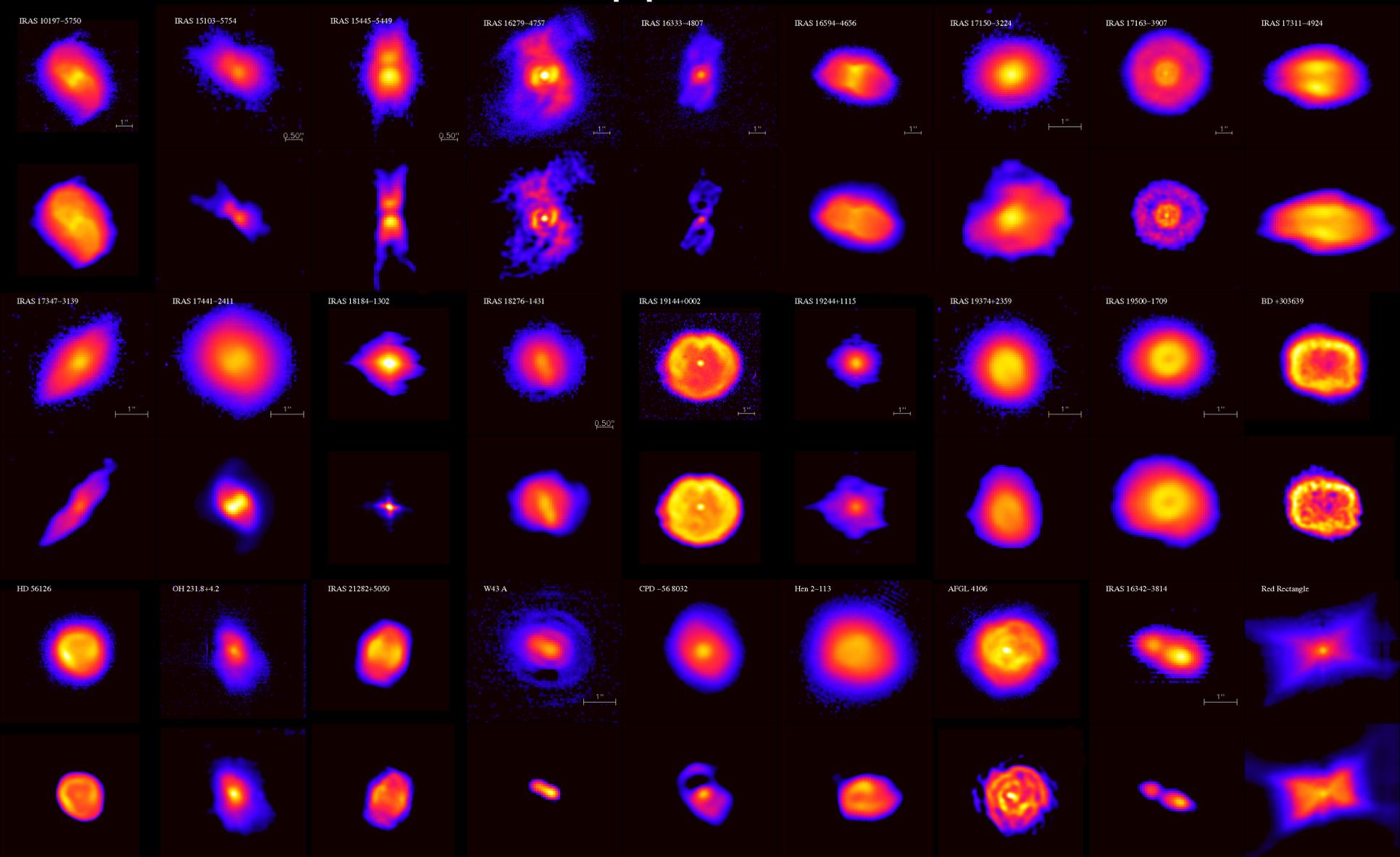
AGB et perte de masse

- Très forte perte de masse (jusque $10^{-4} M_{\text{sol}} \text{an}^{-1}$)
- Formation d'une enveloppe circumstellaire (Gaz et poussière)
- Enrichissement chimique des galaxies



Phase post-AGB

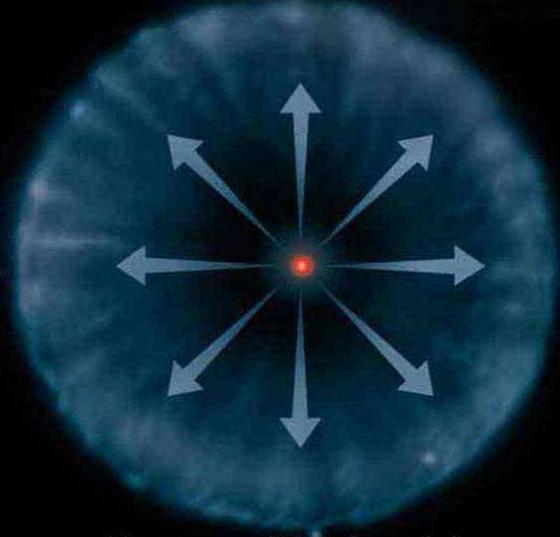
L'enveloppe se détache



Nébuleuse planétaire

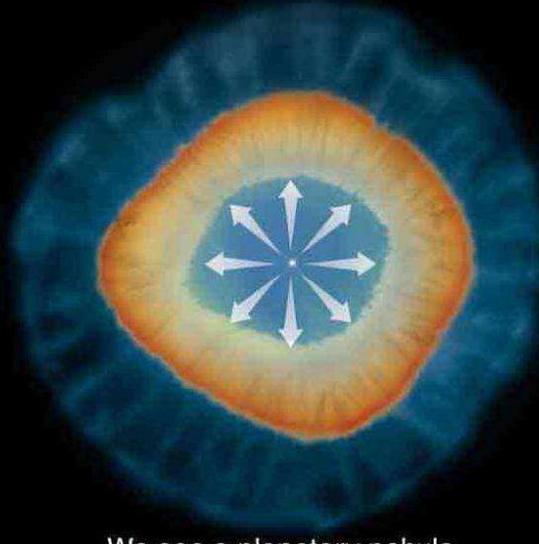
- L'étoile centrale se contracte, se réchauffe et ionise l'enveloppe: vent rapide

Slow stellar wind
from a red giant

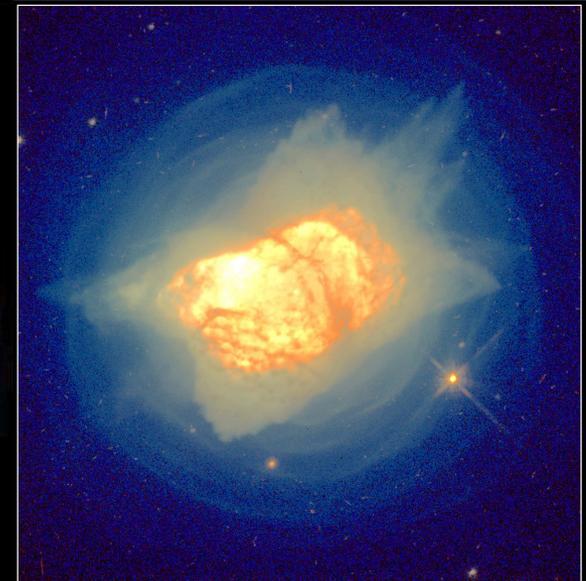


The gases of the slow wind
are not easily detectable.

Fast wind from
exposed interior

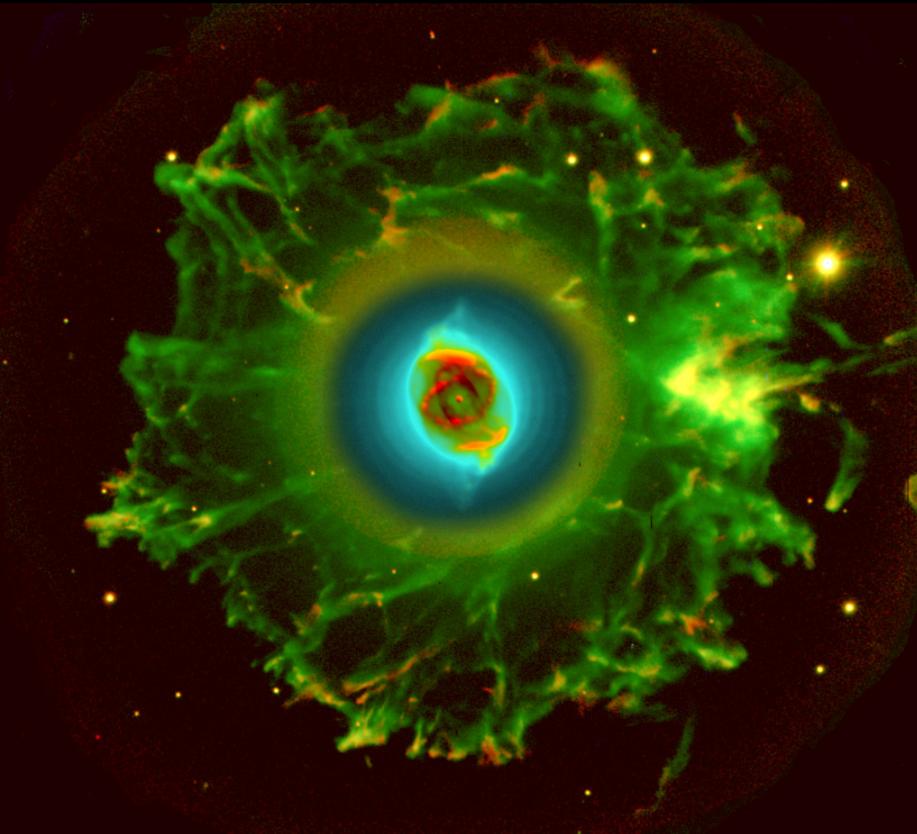


We see a planetary nebula
where the fast wind
compresses the slow wind.



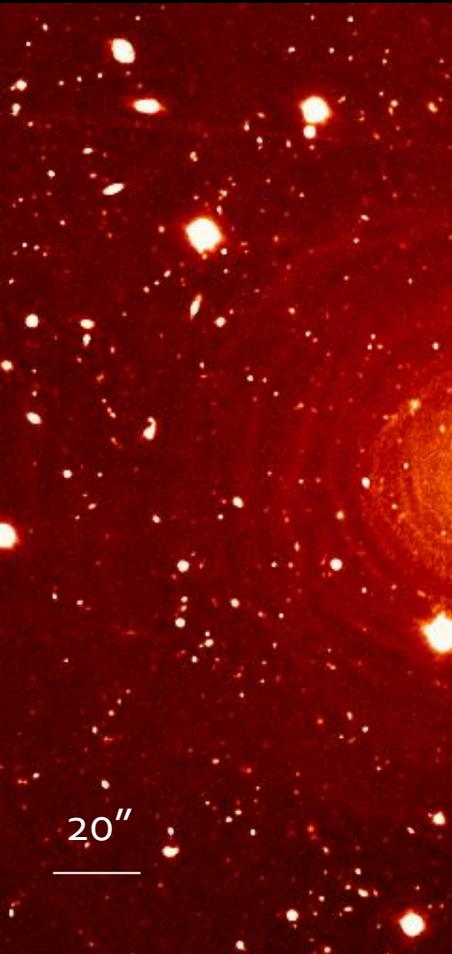
Planetary Nebula NGC 7027
Hubble Space Telescope · WFPC2

L'œil de chat

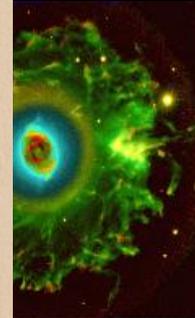
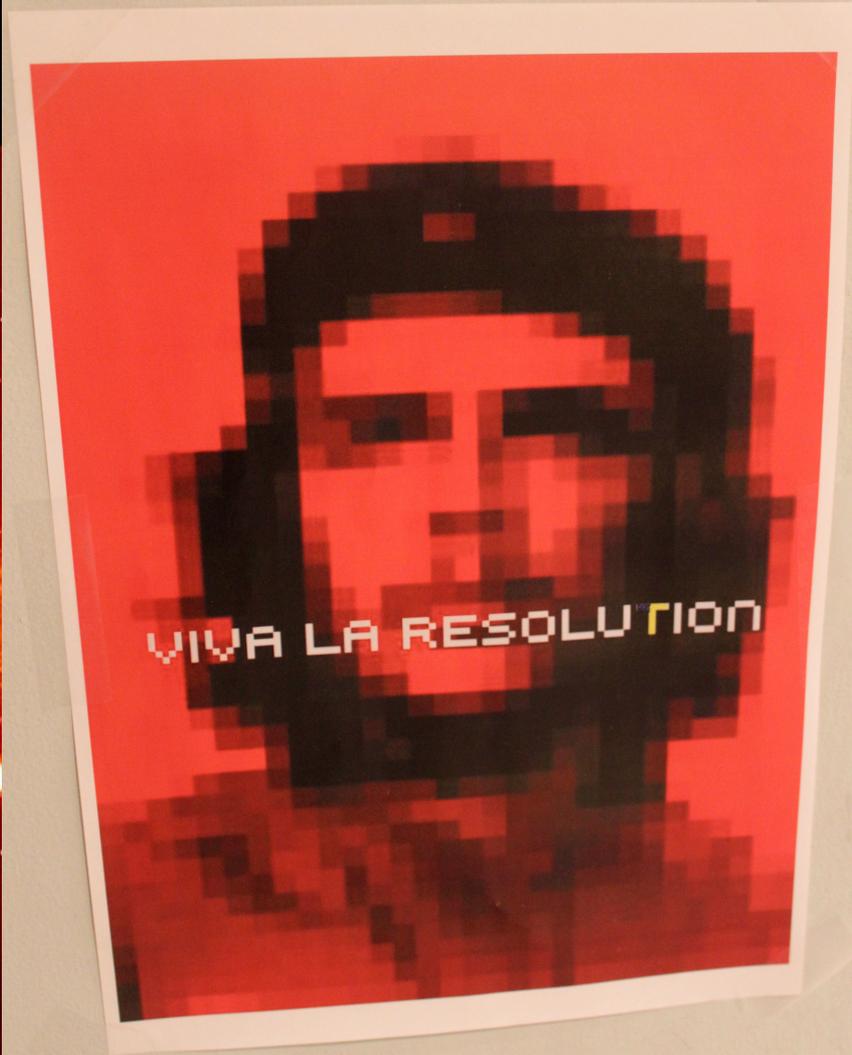


Morp

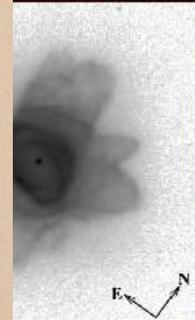
AGB et des
ires



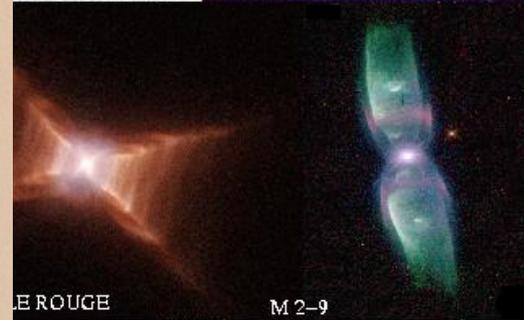
Etoile



NGC 6543 (zoom)



NGC 7027

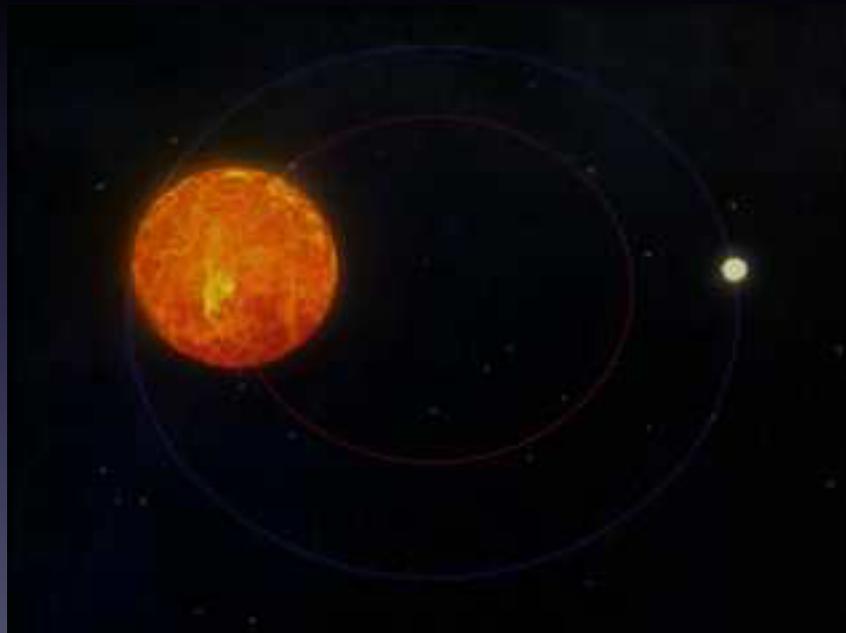


LE ROUGE

M 2-9

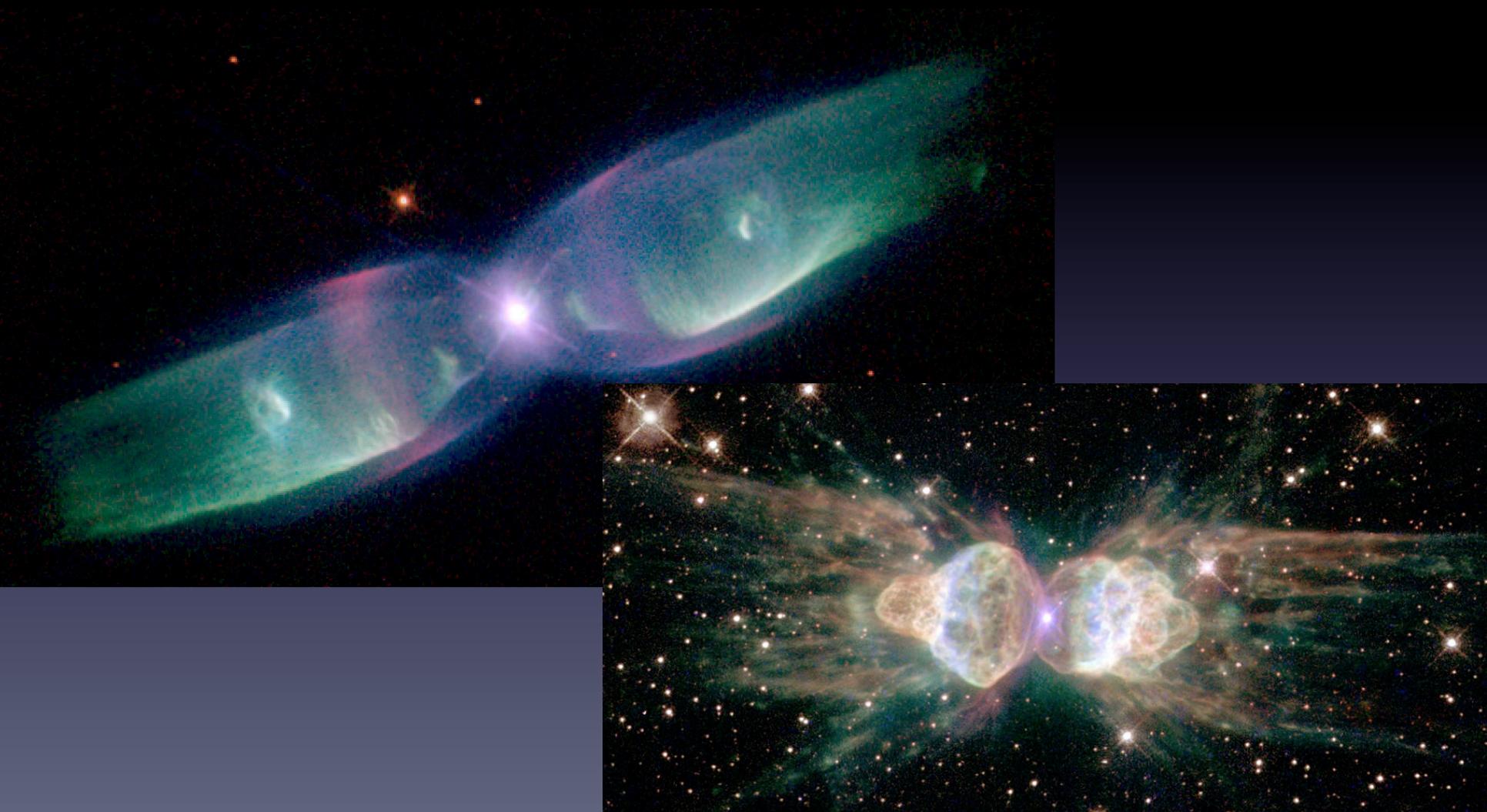
buleuses planétaires

Influence d'un compagnon?



Credit: StSci

Le papillon et la fourmi



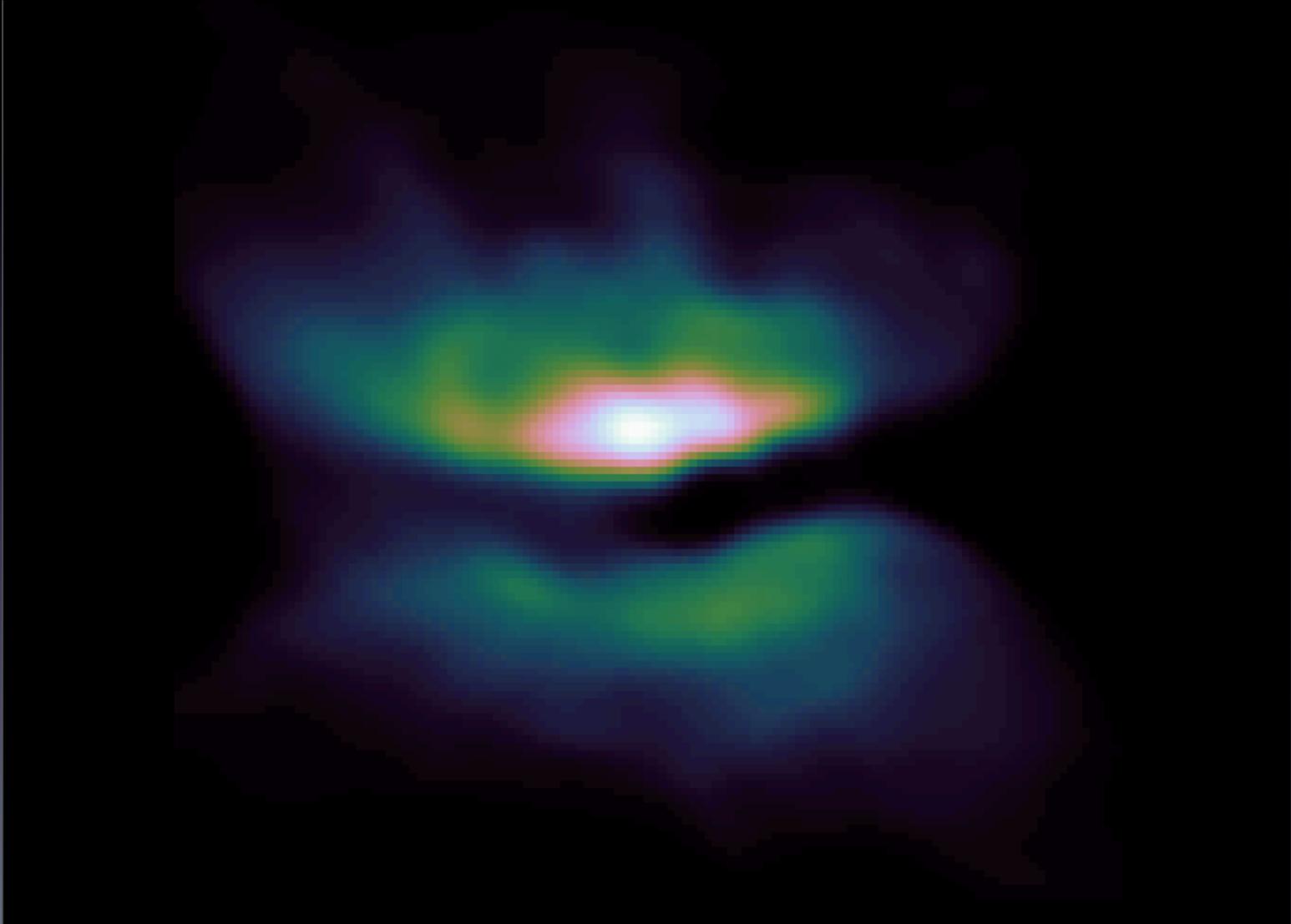
L'hélice et l'insecte



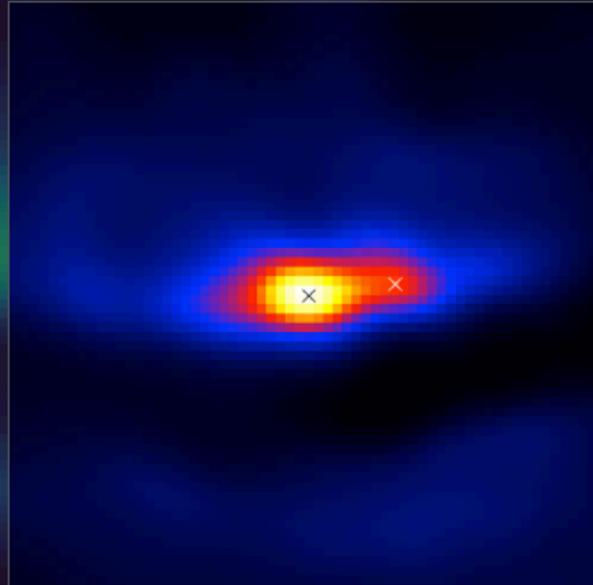
L2 Pup: Naissance d'un papillon cosmique



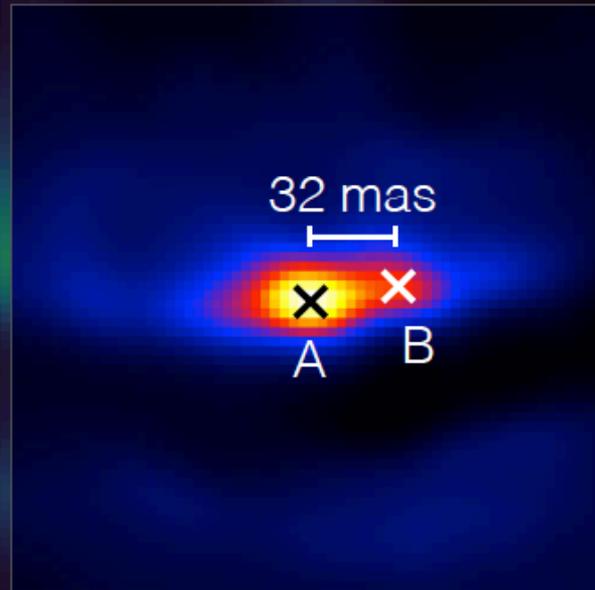
L2 Pup: Naissance d'un papillon cosmique



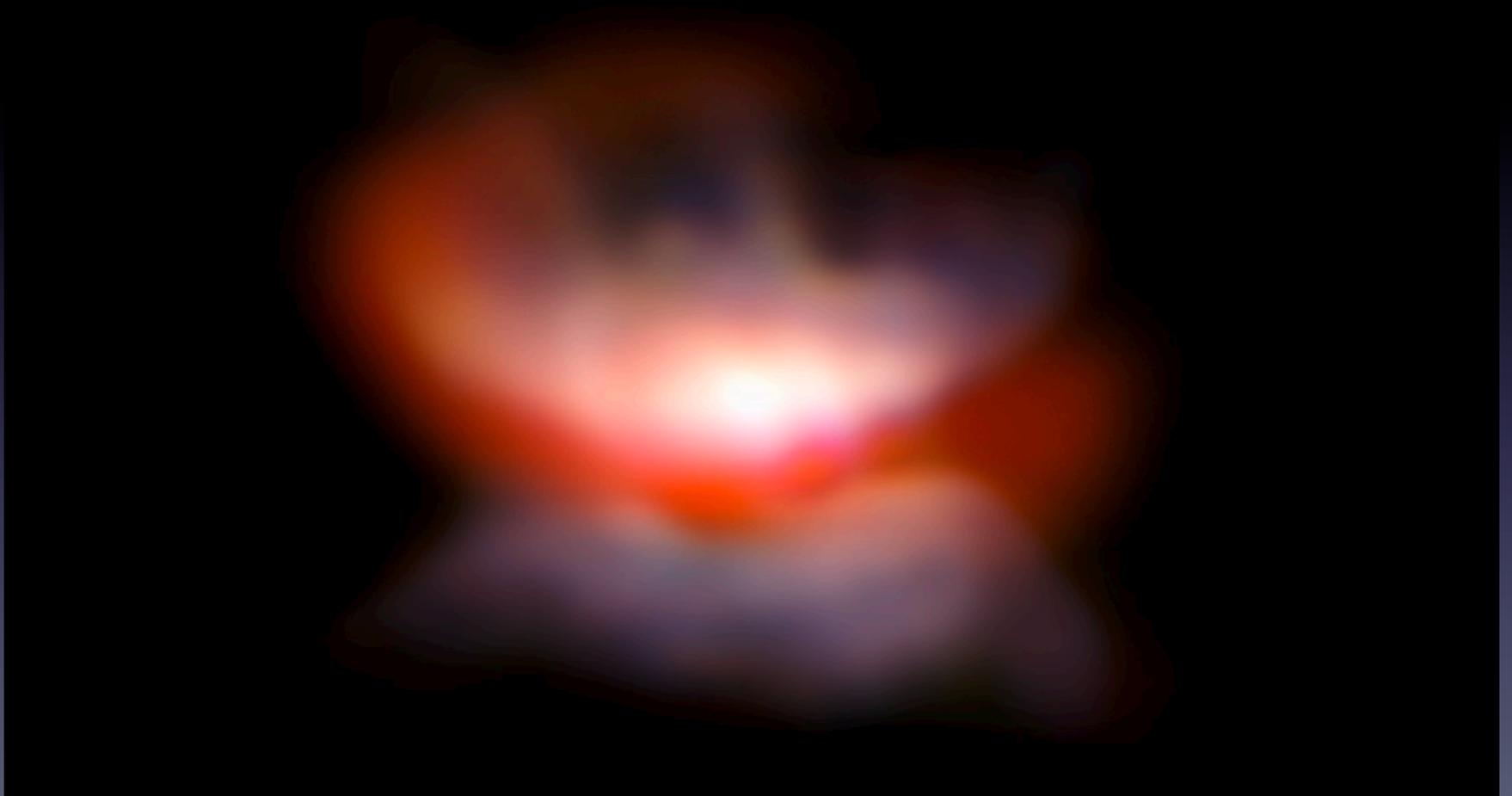
L2 Pup: Naissance d'un papillon cosmique



L2 Pup: Naissance d'un papillon cosmique

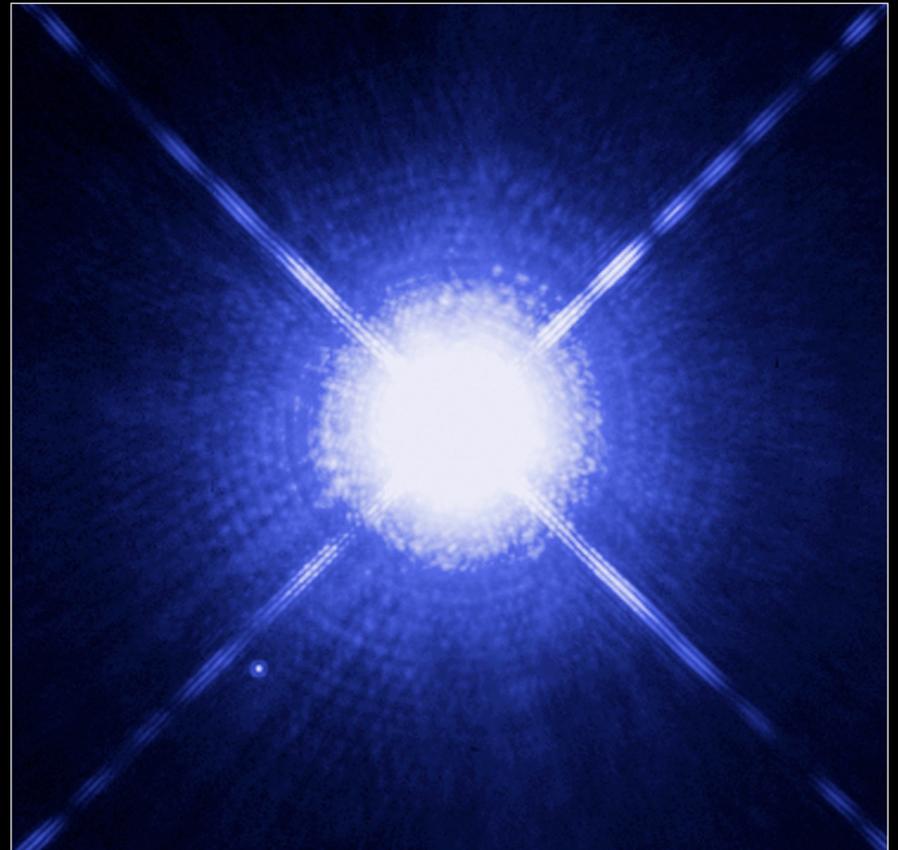


L2 Pup: Naissance d'un papillon cosmique



Les naines blanches

- L'étoile centrale de la nébuleuse planétaire se refroidit progressivement avant de devenir une naine blanche

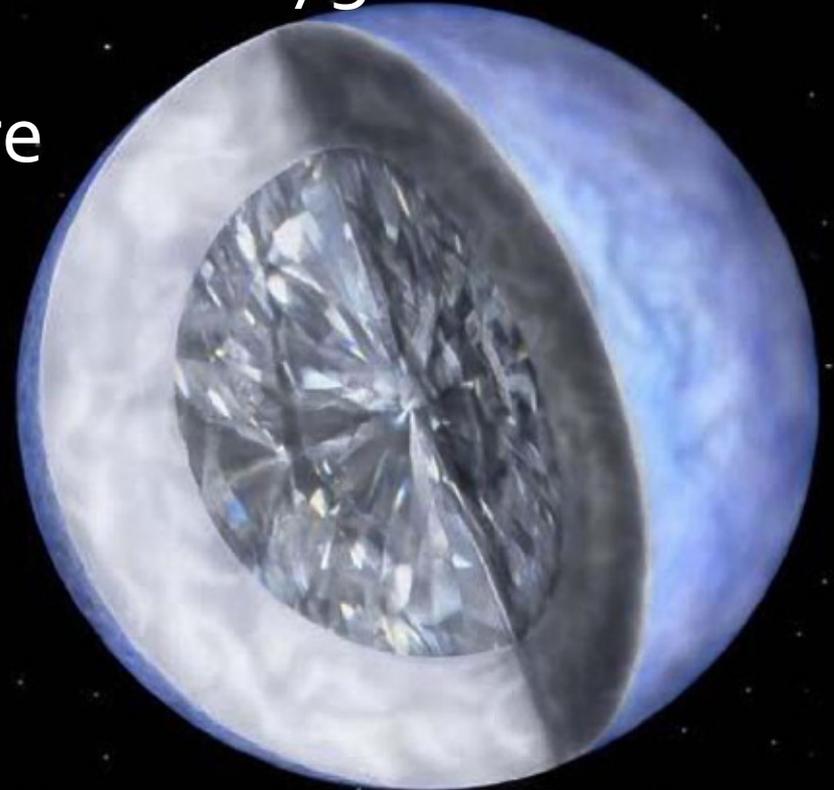


Les naines blanches

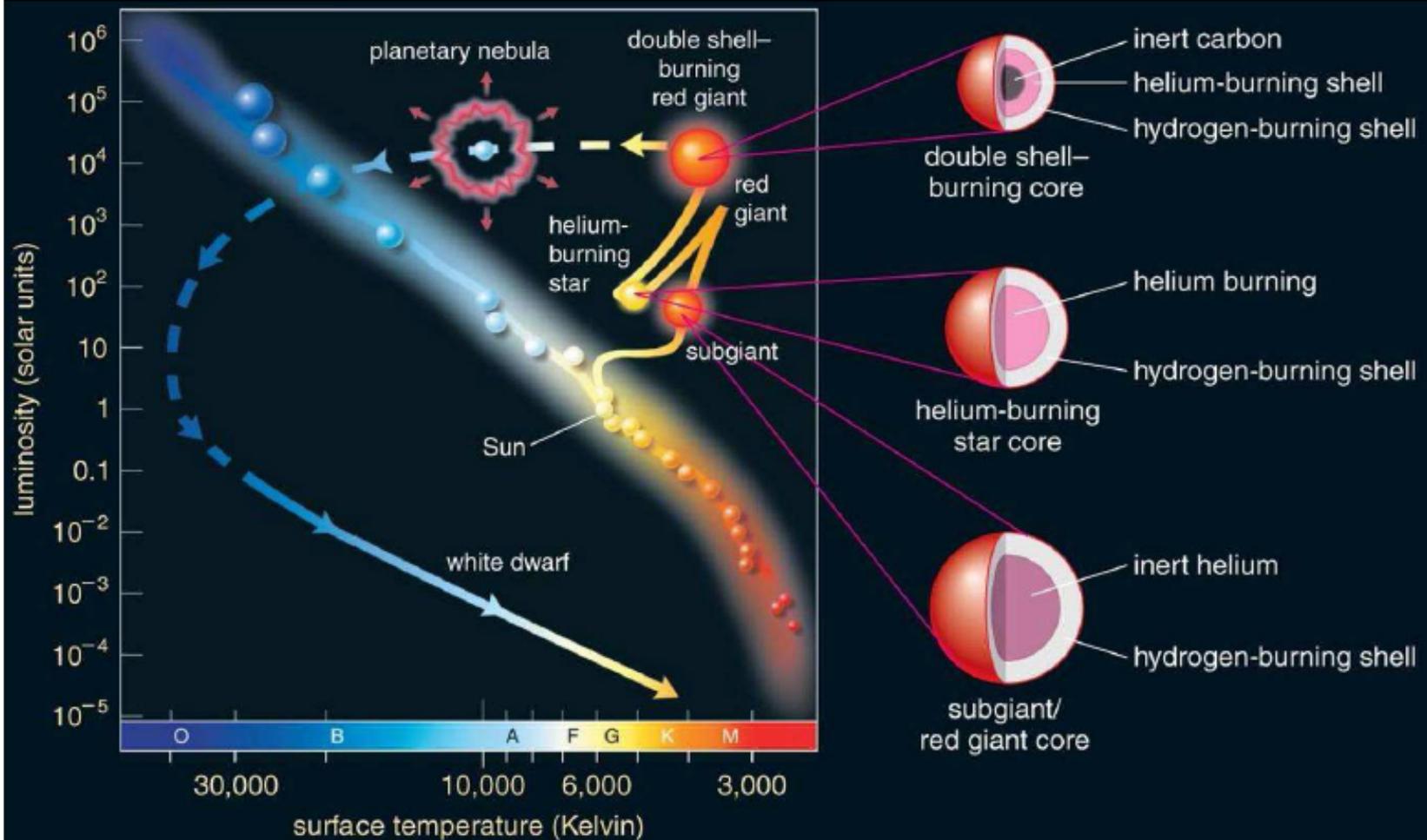
- Masse: 0.8-1.4 fois la masse du soleil
- Taille similaire a celle de la terre
- Très dense: 1 milliard de kg/m³!!
- 1 cuillère a café: 16 tonnes!

Lucy in the Sky With Diamonds

- **BPM 37093**
- Cristal géant de carbone et d'oxygène
- Masse: 0.6 masse solaire
- D~4000 km



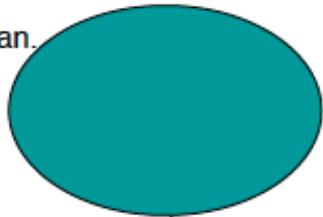
Evolution d'une étoile de masse solaire



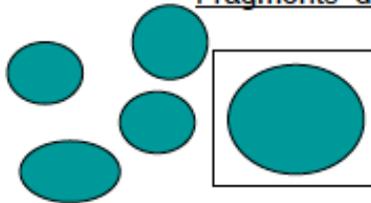
Cycle de vie d'une étoile de masse solaire

Nuage Moléculaire

- $T_{\text{cin}} \sim 10 \text{ K}$
- 1 Milliard d'an.

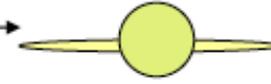


Fragments denses



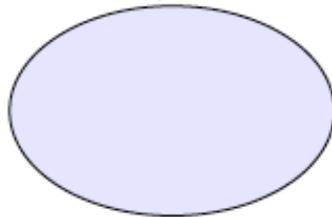
Proto-étoiles

- 0.1-10 Millions d'an.



Nuage diffus

- $T_{\text{cin}} \sim 100 \text{ K}$



Séquence principale

- H → He Coeur
- 10-7000 Millions d'an.



Géante rouge

- He → C Coeur
- H → He Coquille
- 1-6 Millions d'an.

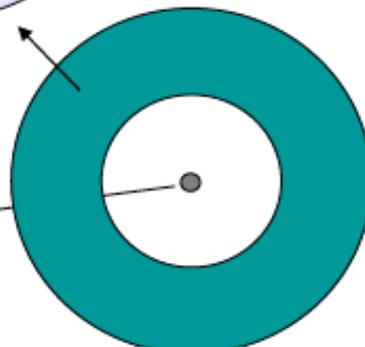
Naine blanche

- Coeur C/O inerte
- Faible radiation produite
- 1 Milliard d'an.



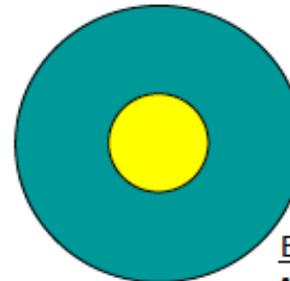
Nébuleuse Planétaire

- Coeur dense, Coquille He → C, Coeur C/O inerte
- Enveloppe de gaz et poussières
- 10 000 ans

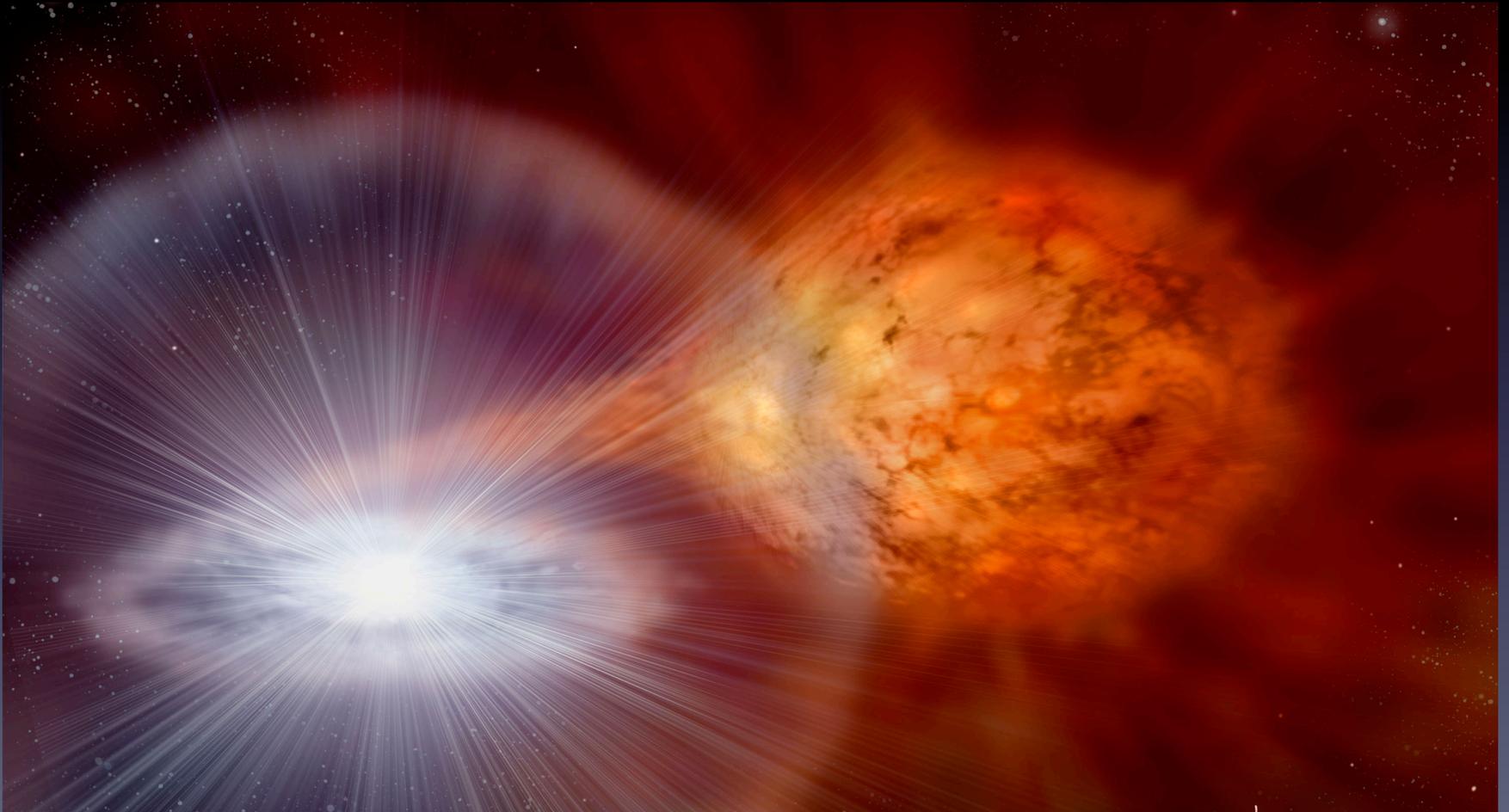


Etoile AGB

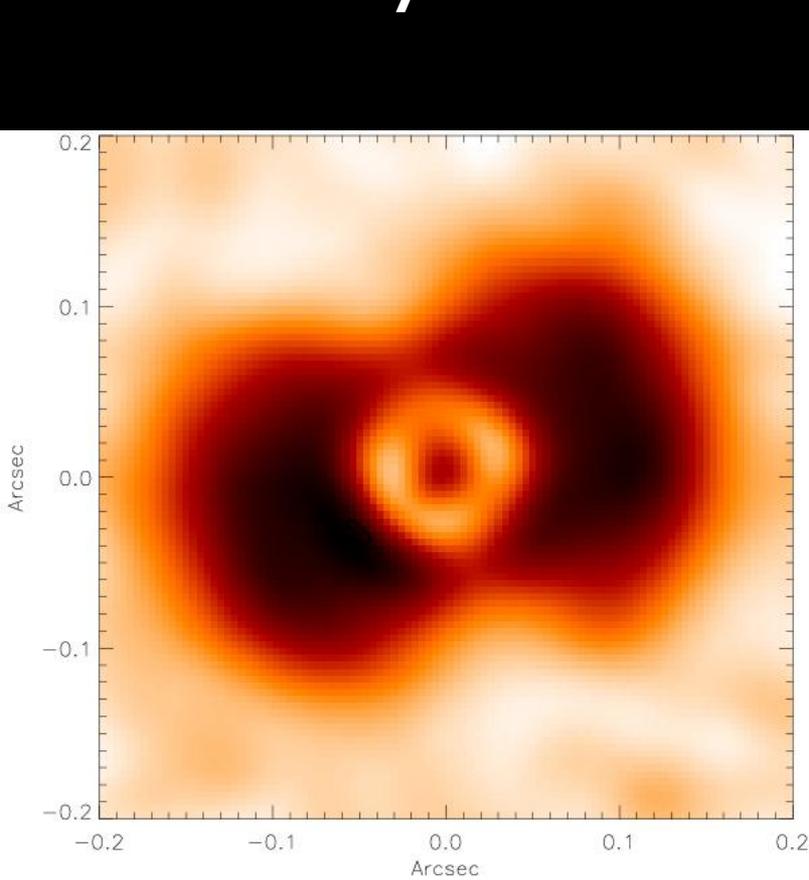
- Coeur C/O Inerte
- Coquilles H → He & He → C
- ~1 Million d'an.



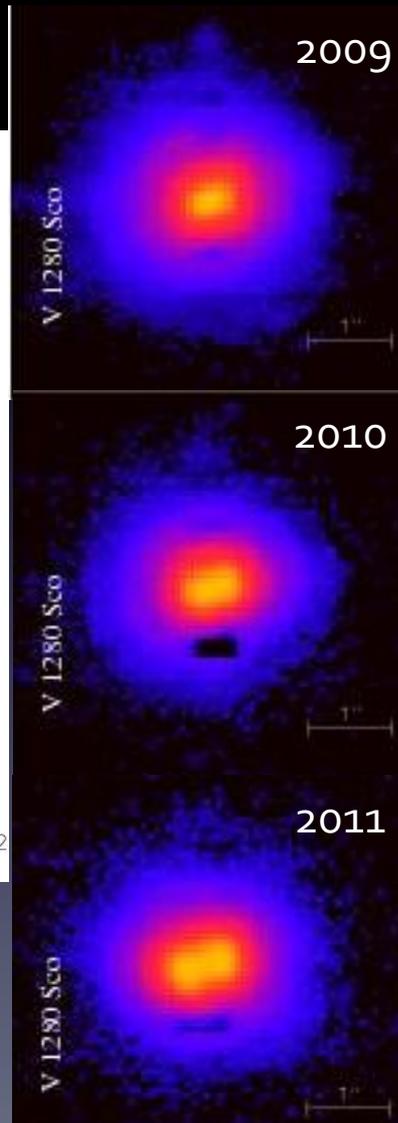
Naines blanches dans des systèmes binaires: Novae



Naines blanches dans des systemes binaires: Novae

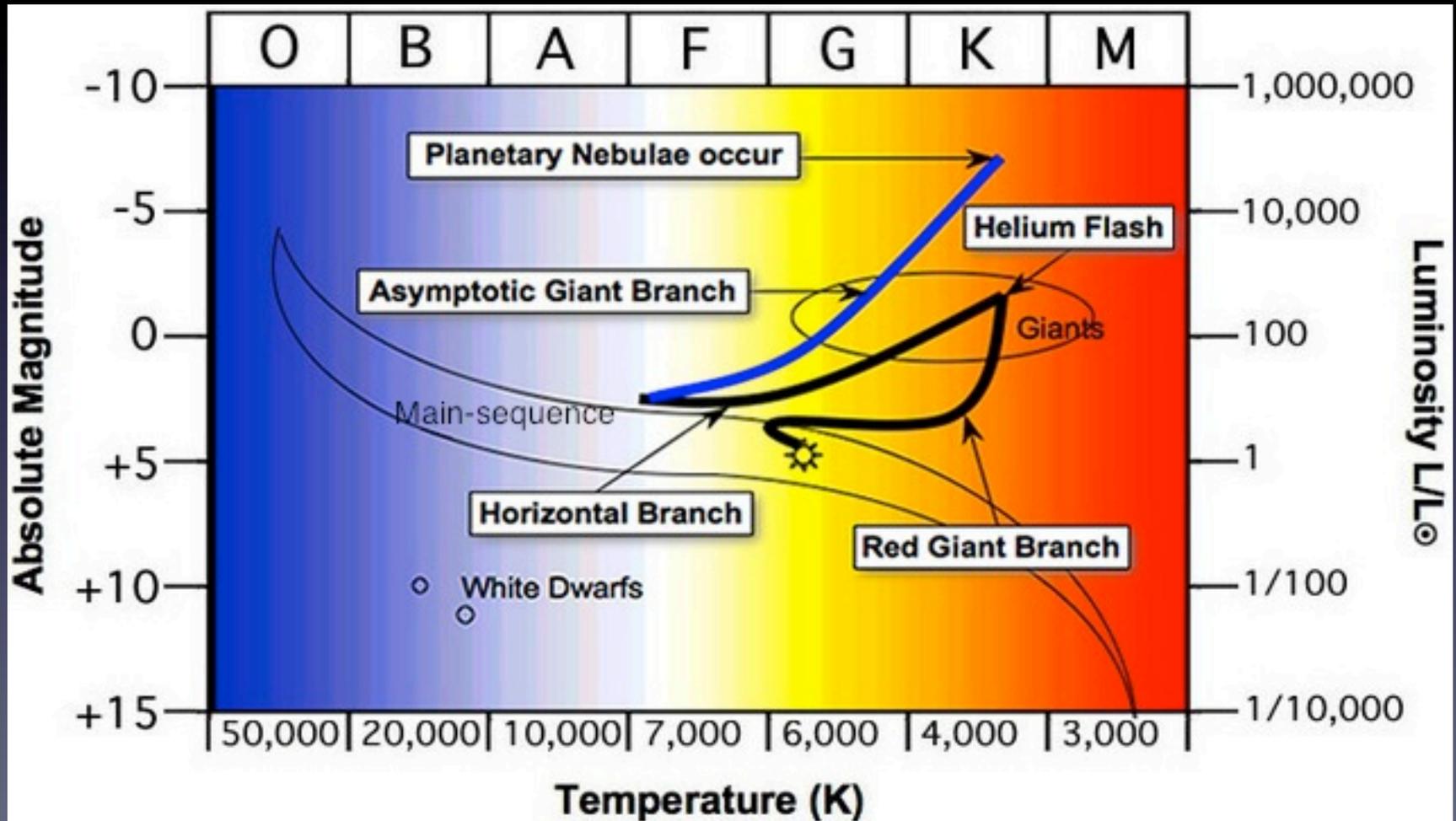


V1280 Sco

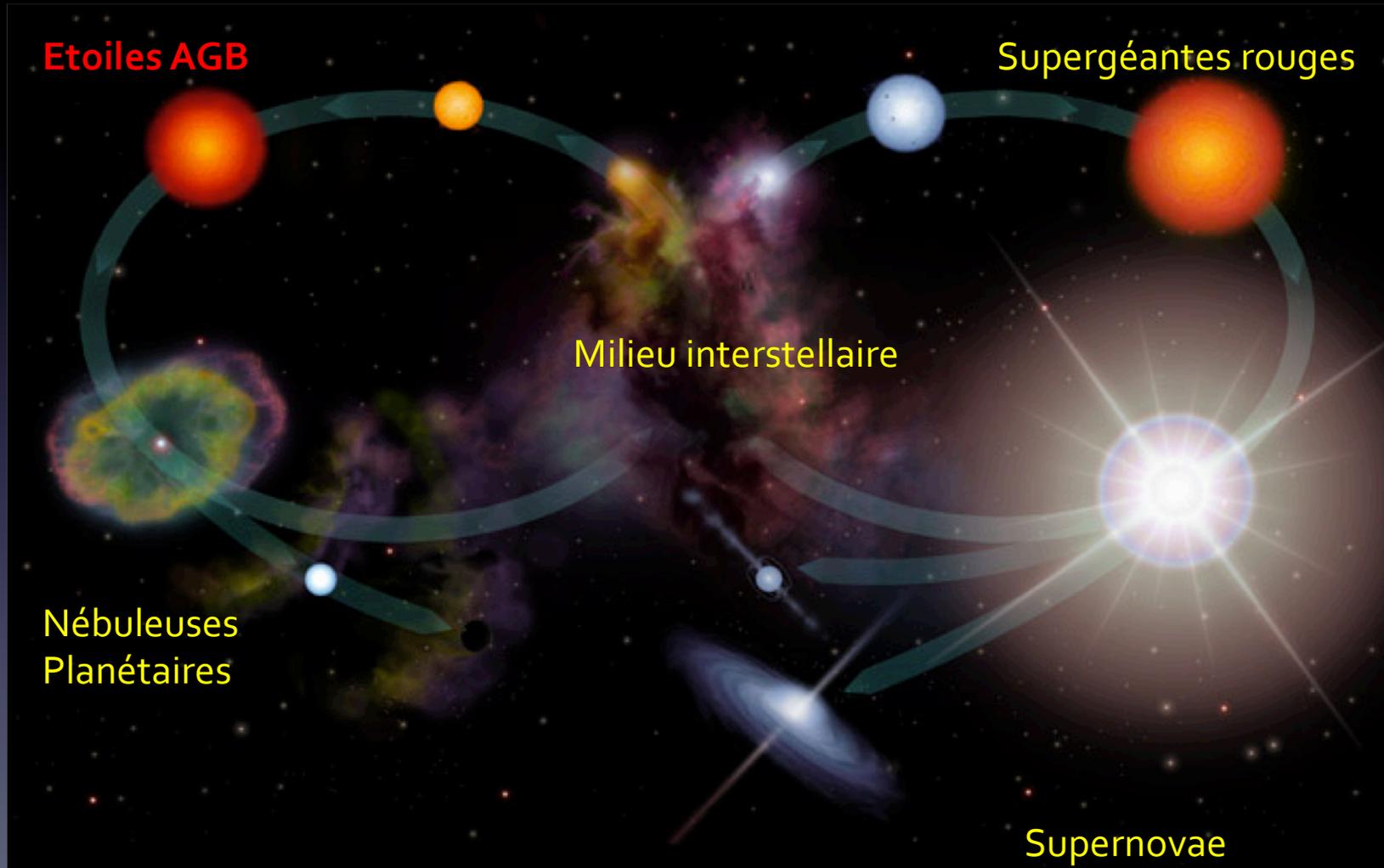


Naissance d'une
nébuleuse bipolaire
en direct 😊

Résumé évolution stellaire étoile masse soleil



La vie des étoiles



Evolution des étoiles massives

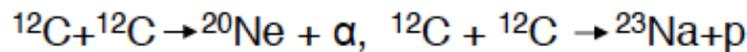
- Etoiles plus massives que 8 masses solaires
- Similaire aux étoiles de faible masse jusque qu'à l'exhaustion de l'hélium
- Elles sont plus chaudes: fusion du carbone
- Des éléments de plus en plus lourds se forment, mais génèrent de moins en moins d'énergie: les phases de fusion de viennent de plus en plus courtes.

Evolution des étoiles massives

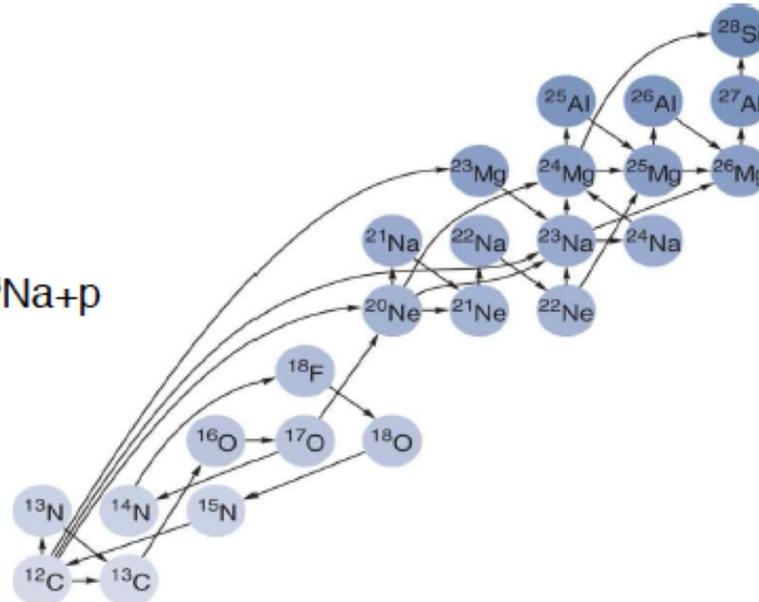
Fusion du Carbone :

Température = 600 Millions K

$M > 4 M_{\odot}$



....

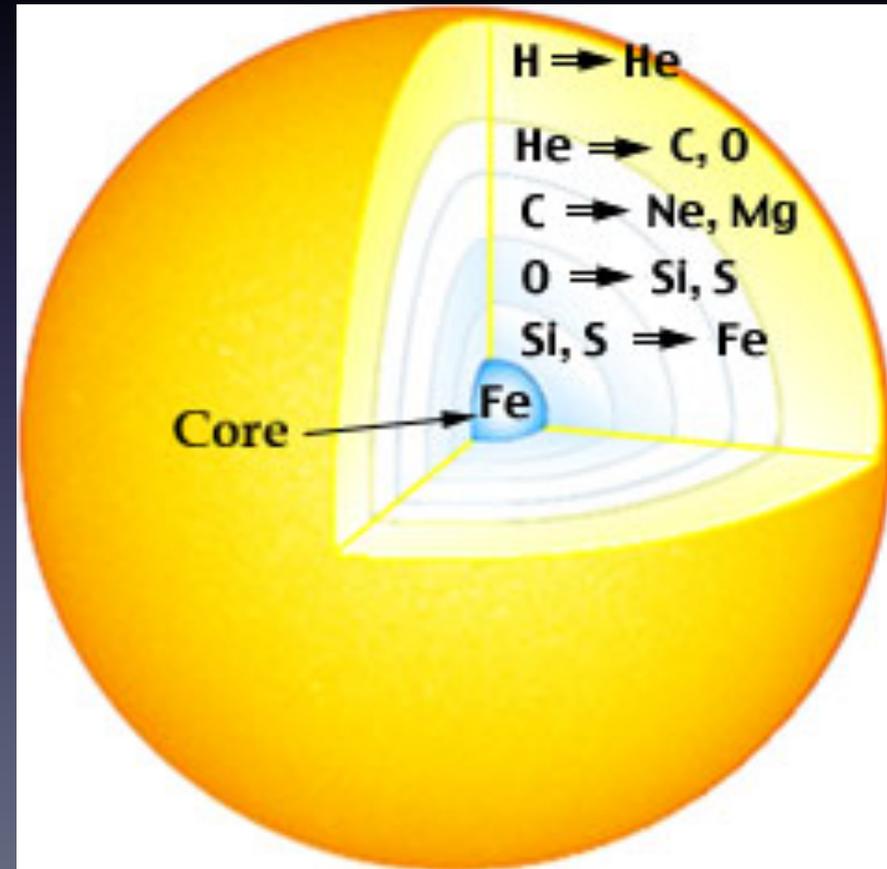


Nuclear Fuel	Nuclear Products	Minimum Ignition Temperature	Main-Sequence Mass Needed to Ignite Fusion	Duration of Fusion in a 25- M_{\odot} Star
H	He	4×10^6 K	$0.1 M_{\odot}$	7×10^6 yr
He	C, O	120×10^6 K	$0.4 M_{\odot}$	0.5×10^6 yr
C	Ne, Na, Mg, O	600×10^6 K	$4 M_{\odot}$	600 yr
Ne	O, Mg	1.2×10^9 K	$\sim 8 M_{\odot}$	1 yr
O	Si, S, P	1.5×10^9 K	$\sim 8 M_{\odot}$	~ 0.5 yr
Si	Ni to Fe	2.7×10^9 K	$\sim 8 M_{\odot}$	~ 1 day

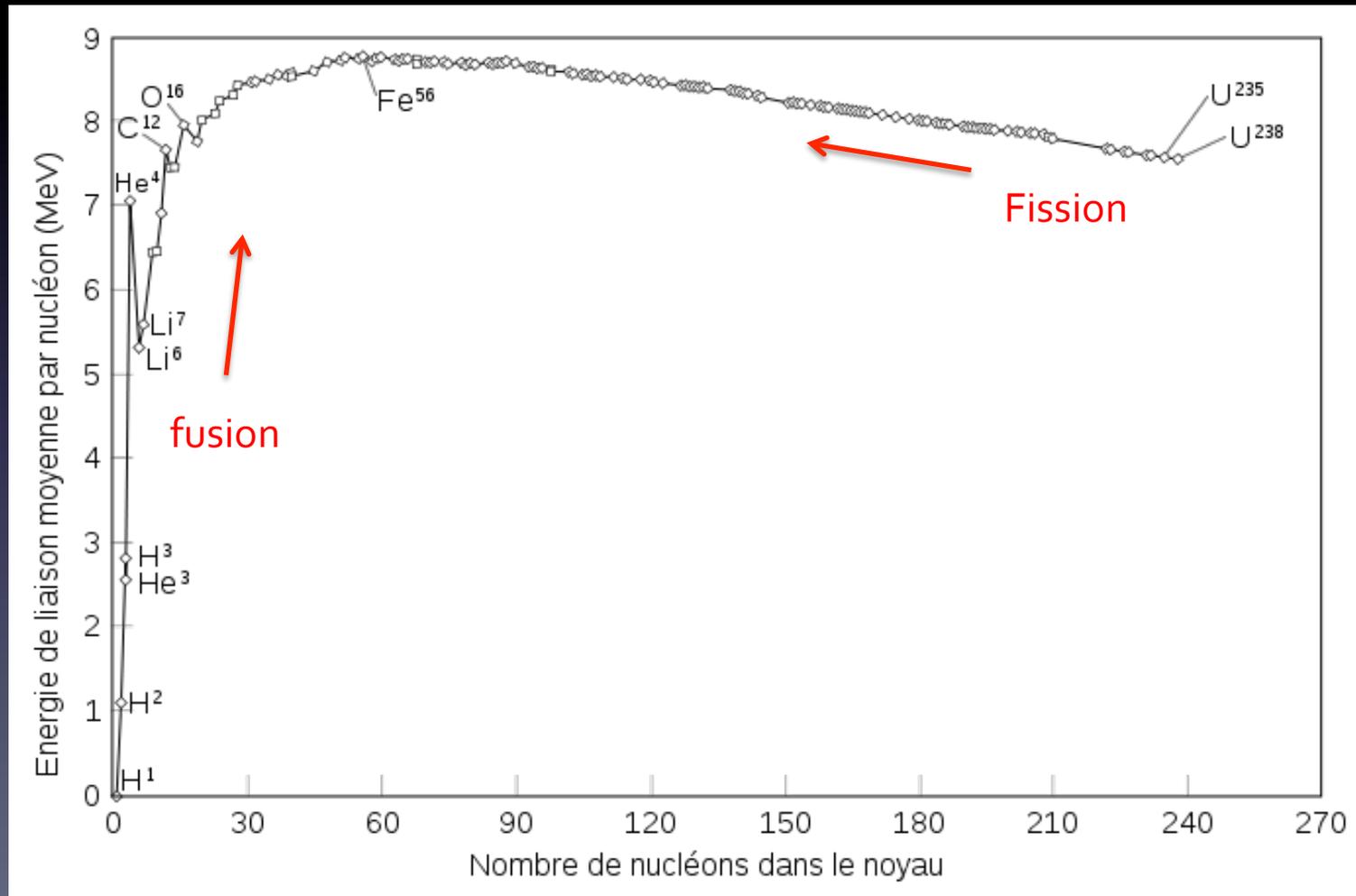
Etoiles massives

- Fusions d'éléments de plus en plus lourds
- Jusqu'au fer

Phase	Température (million K)	Durée
H fusion	40	7 million ans
He fusion	200	500,000 ans
C fusion	600	600 ans
Ne fusion	1,200	1 an
O fusion	1,500	6 jours
Si fusion	2,700	1 jour



Pourquoi la fusion s'arrête au Fer

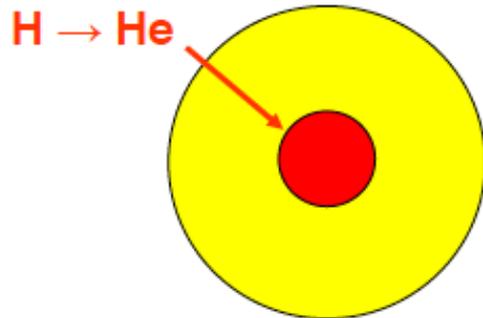


Supernovae (type II)

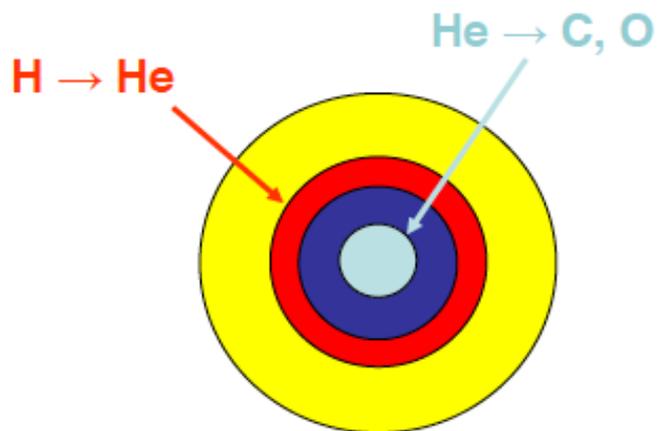
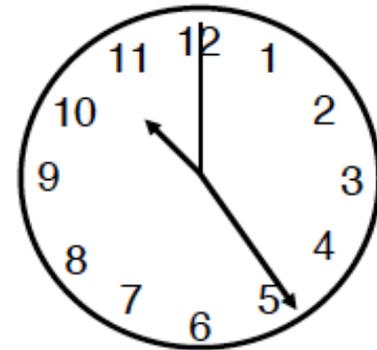
- Le cycle de fusion s'arrête au fer.
- L'étoile n'a alors plus de source d'énergie et ne peut plus lutter contre la gravité
- L'étoile s'effondre très rapidement (moins de 1s): fusion d'éléments plus lourds
- Protons et électrons combinent pour former des neutrons et des neutrinos: étoile à neutron ou trou noir
- La matière qui chute rebondit sur l'étoile à neutron et est éjectée

Evolution d'une étoile massive [$M > 8 M_{\odot}$]

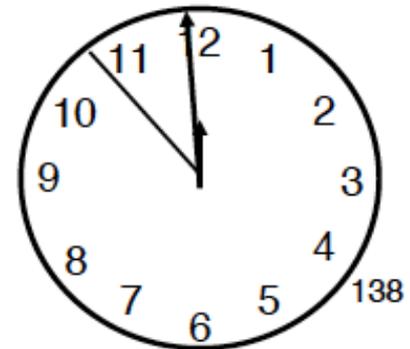
Supposons que la durée de vie de l'étoile est 24h...

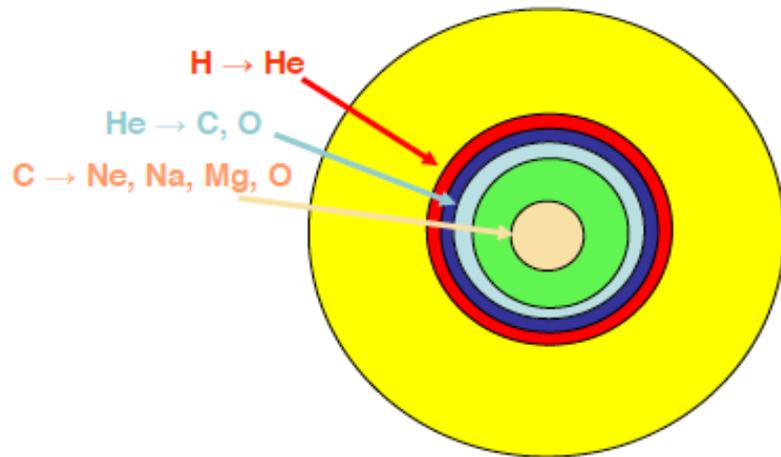


Séquence principale
Fusion H
22 h, 24 min.



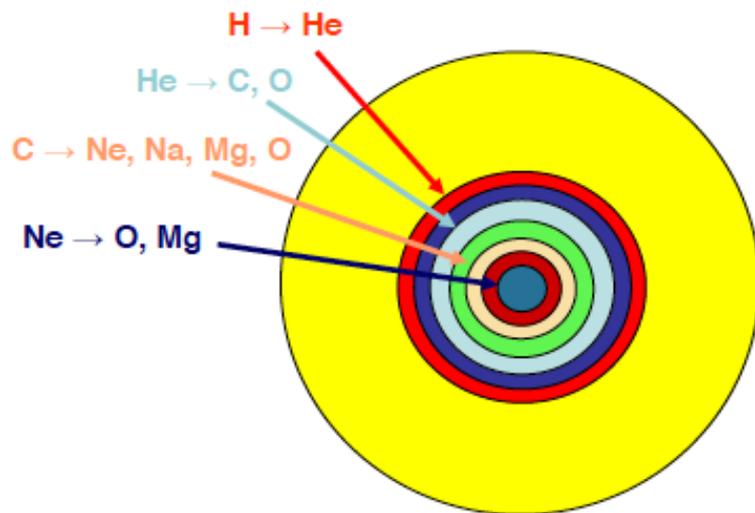
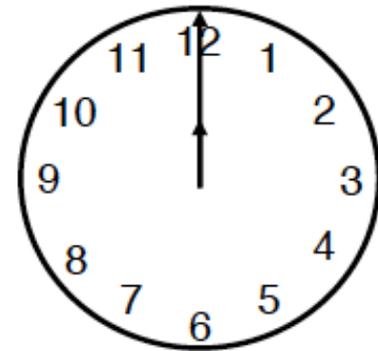
Géante rouge
Fusion He
1 h, 35 min, 53 s





Fusion C

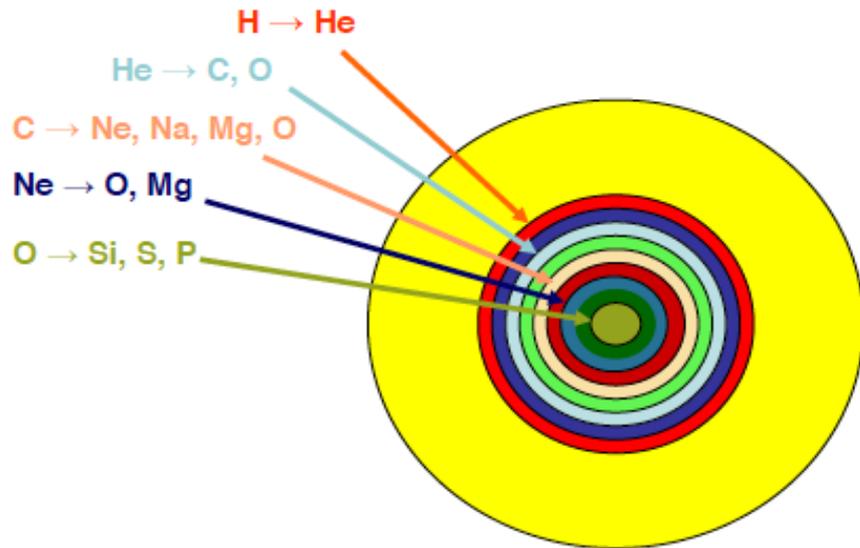
6.99 s



Fusion Ne

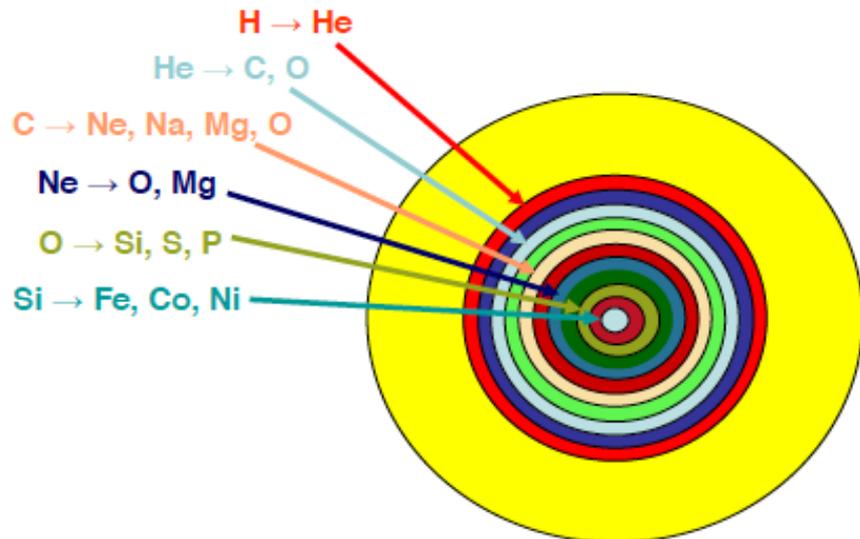
6 ms

23:59:59.996



Fusion O
3.97 ms

23:59:59.99997



Fusion Si
0.03 ms

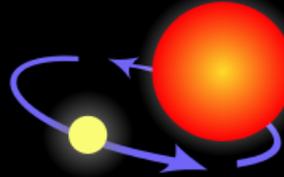
Fin
0.03 msec!!

Supernovae (type Ia)

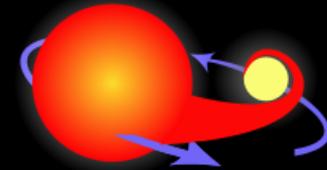
The progenitor of a Type Ia supernova



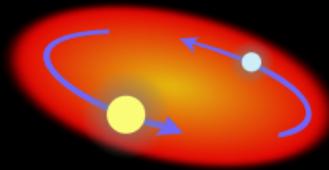
Two normal stars are in a binary pair.



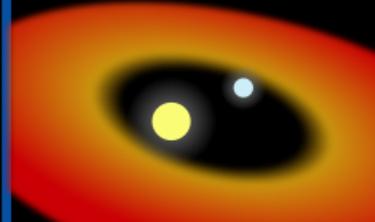
The more massive star becomes a giant...



...which spills gas onto the secondary star, causing it to expand and become engulfed.



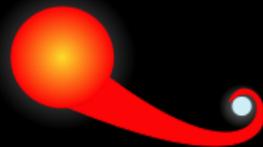
The secondary, lighter star and the core of the giant star spiral toward within a common envelope.



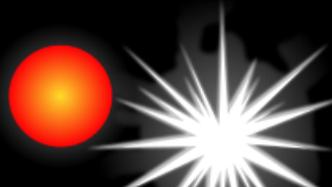
The common envelope is ejected, while the separation between the core and the secondary star decreases.



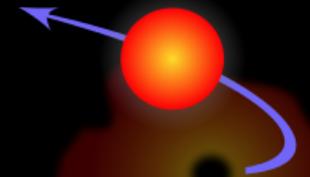
The remaining core of the giant collapses and becomes a white dwarf.



The aging companion star starts swelling, spilling gas onto the white dwarf.



The white dwarf's mass increases until it reaches a critical mass and explodes...



...causing the companion star to be ejected away.

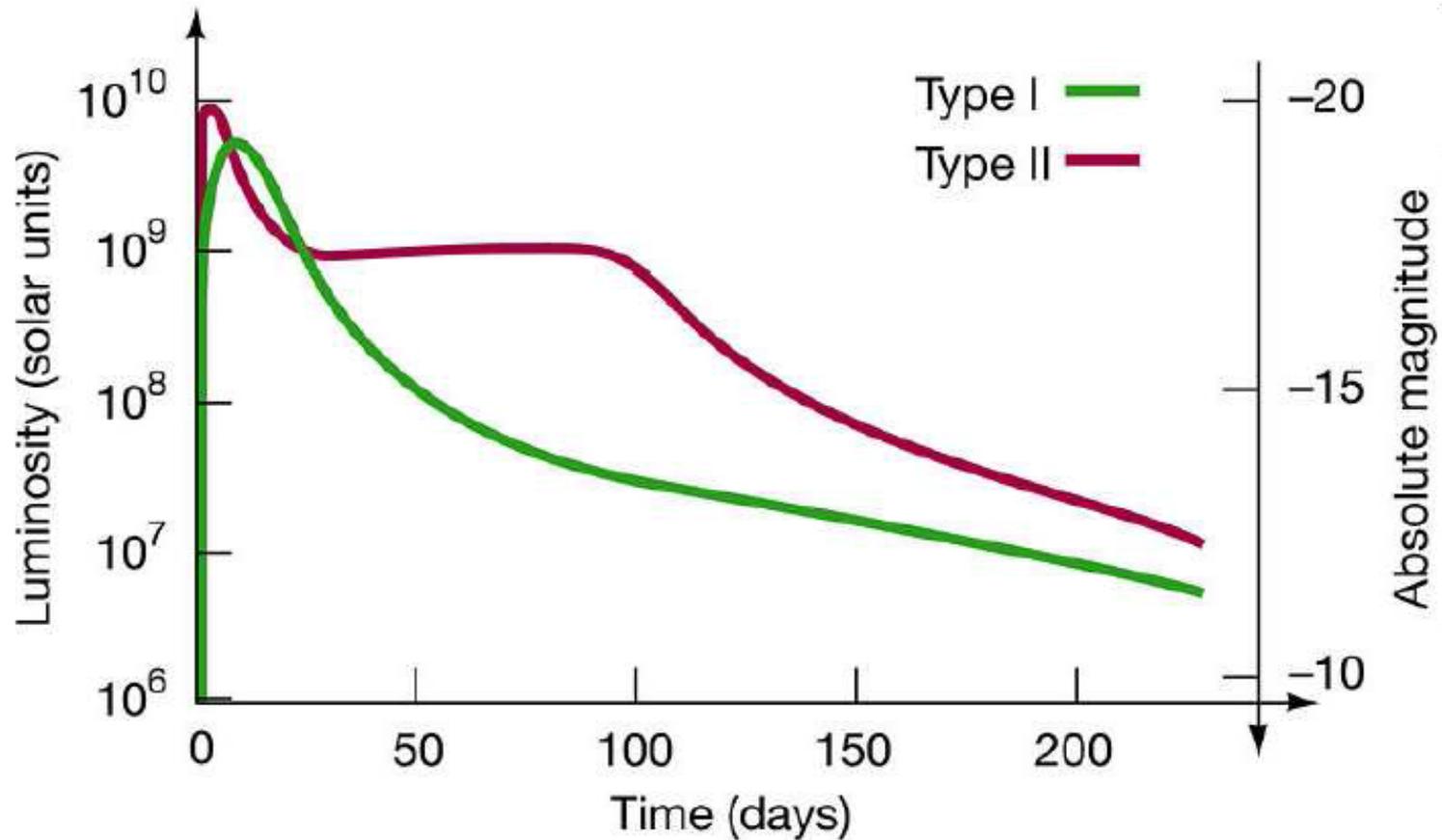
Supernovae (type Ia)



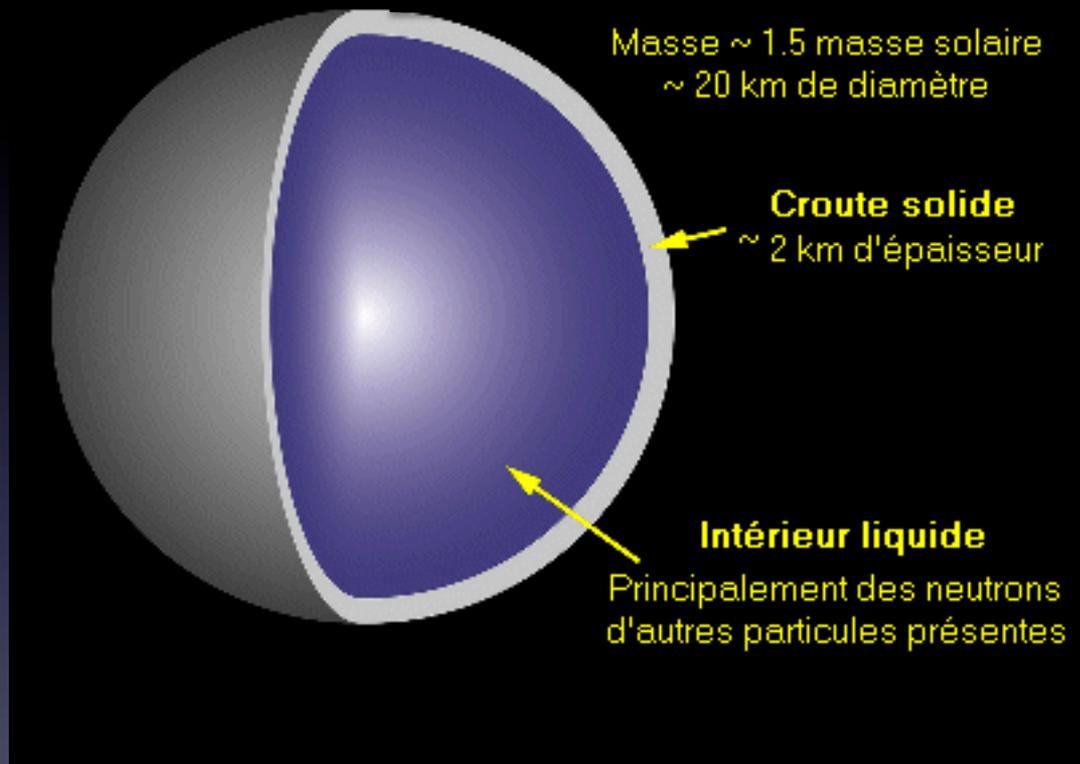
Supernova : Courbes de lumières

Type I : Effondrement d'une naine blanche ayant accréte de la matière

Type II : Effondrement d'une étoile massive



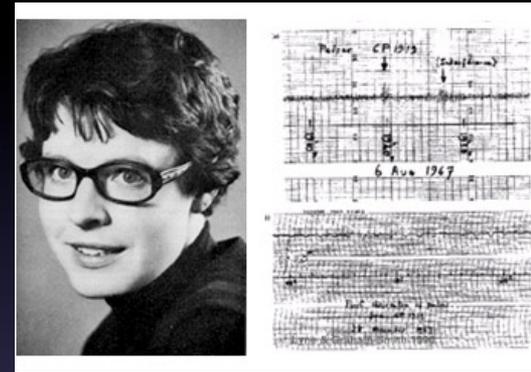
Etoile à neutrons



Une cuillère à café d'étoile à neutron? 10 millions de tonnes

Destin du coeur

- L'étoile à neutron qui reste au coeur tourne vite: pulsar



- Si la masse de l'étoile à neutron est supérieure à 3.2 masses solaires, elle s'effondre et forme un trou noir.



Supernovae récentes

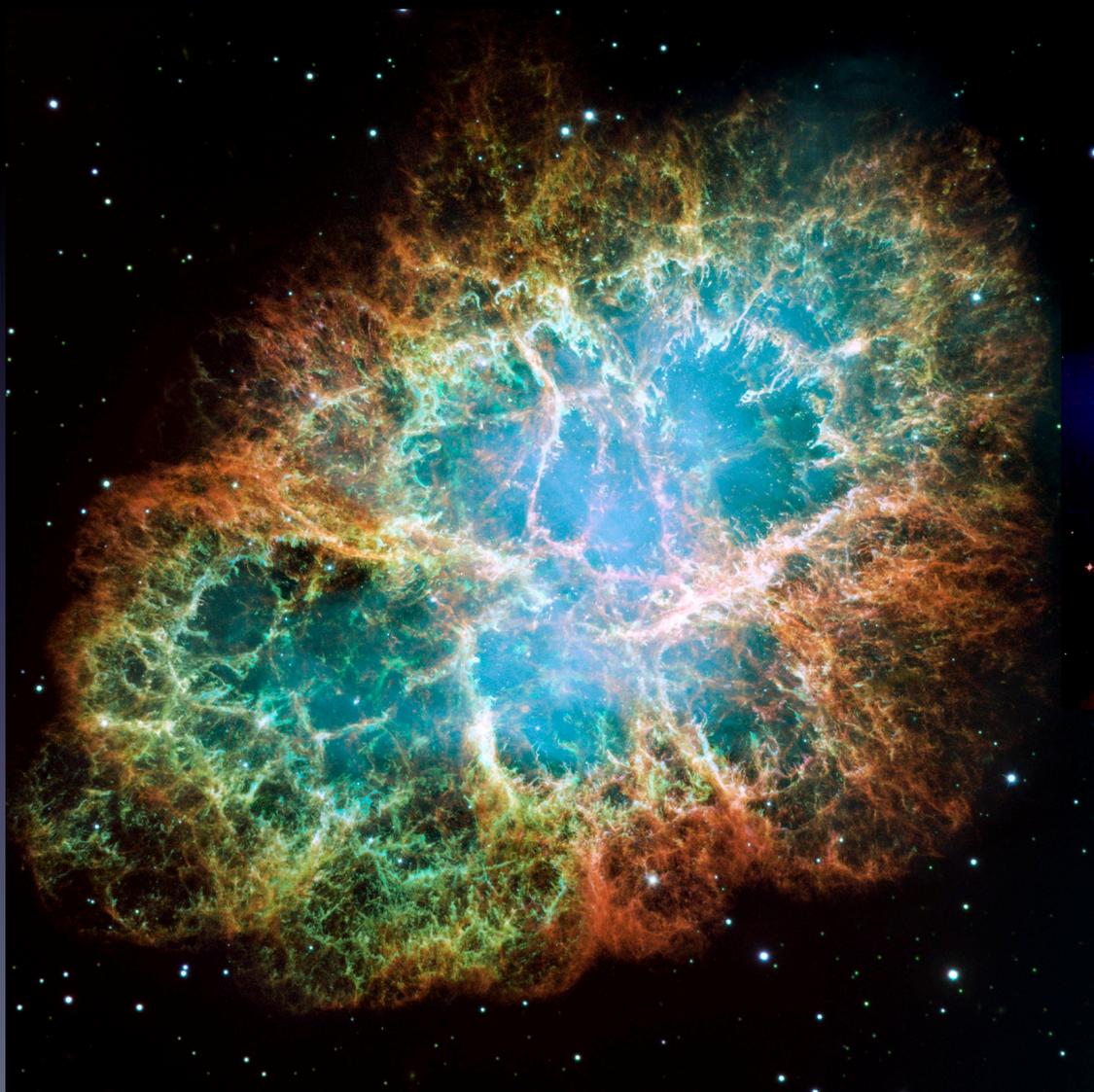
1054, explosion dans la Galaxie

- Europe: pas de données claires
- China: “étoile invitée” (*kè xīng* 客星)
- Amérindiens: pétroglyphes



Chaco canyon (Nouveau Mexique)

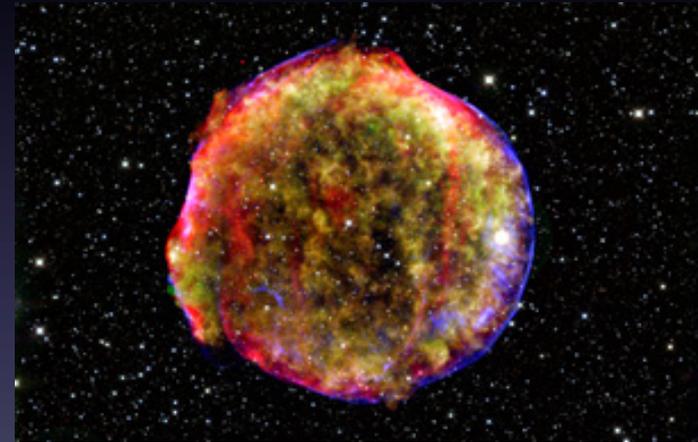
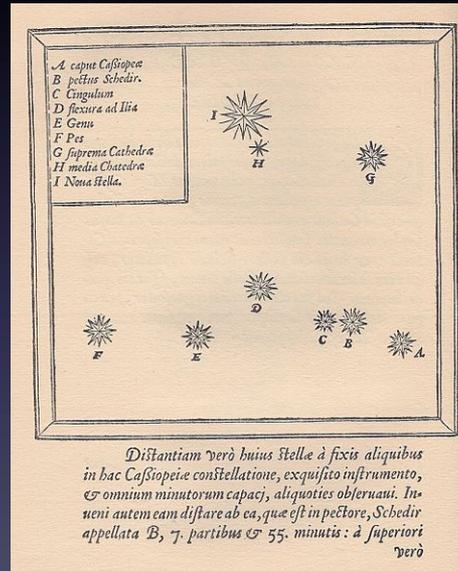
La nébuleuse du crabe



Supernovae récentes

11 Novembre 1572

Tycho Brahe



Une “nouvelle étoile”
 (“nova stella”)

11 Novembre 1572
Tycho Brahe

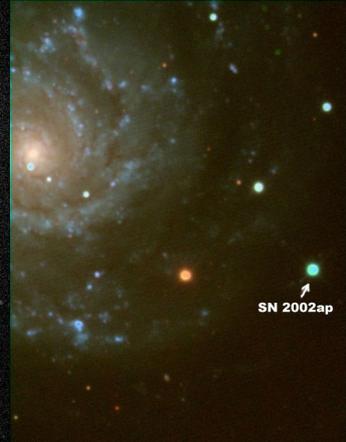
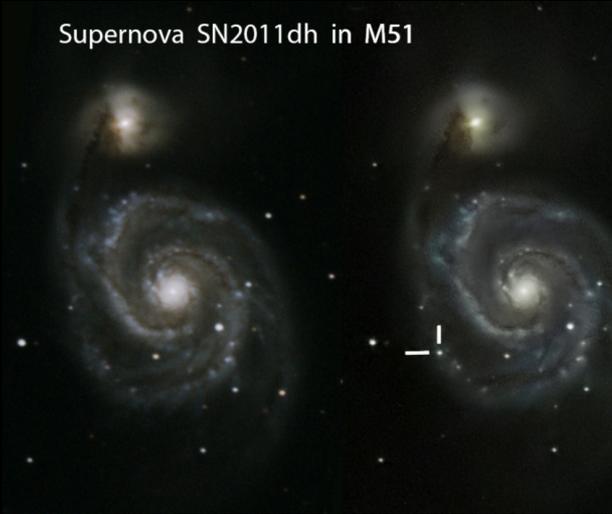


Le soir du 11 novembre après le coucher du Soleil, je contemplais les étoiles par un ciel clair. J'ai alors été frappé par la présence inhabituelle d'une nouvelle étoile, qui brillait juste au-dessus de ma tête, et qui surpassait toutes les autres par son éclat. Il s'agit d'un miracle, quelque chose qui n'a jamais été vu depuis le commencement du Monde. "

Pas de parallaxe! Début de l'astrophysique

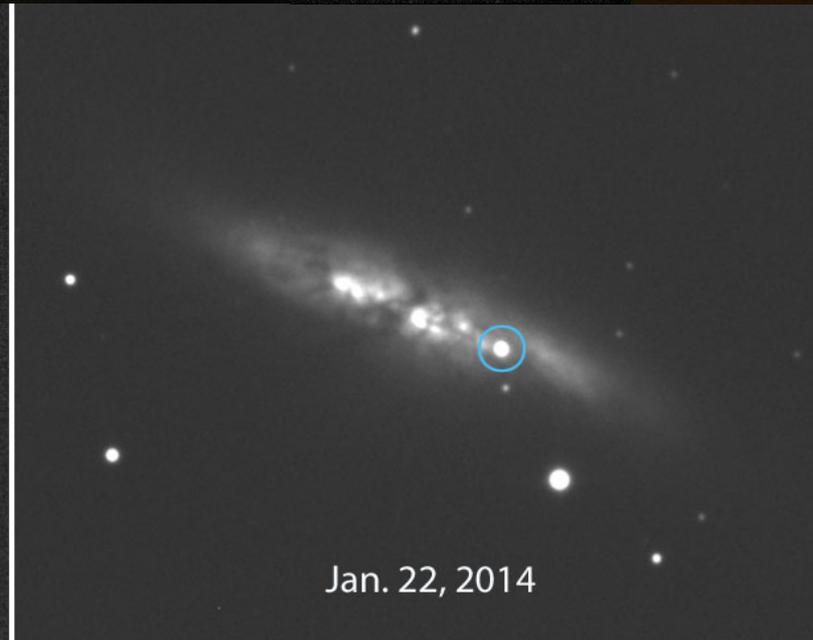
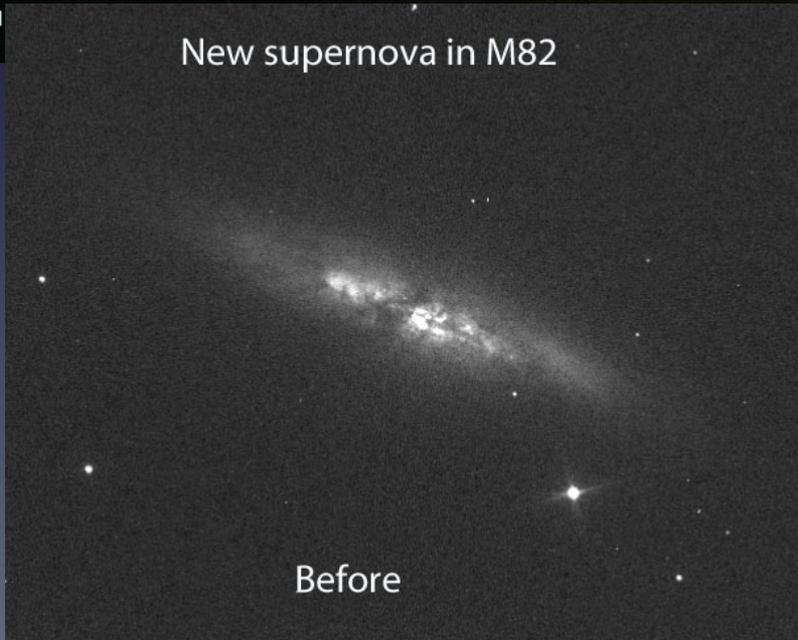
Supernovae

Supernova SN2011dh in M51

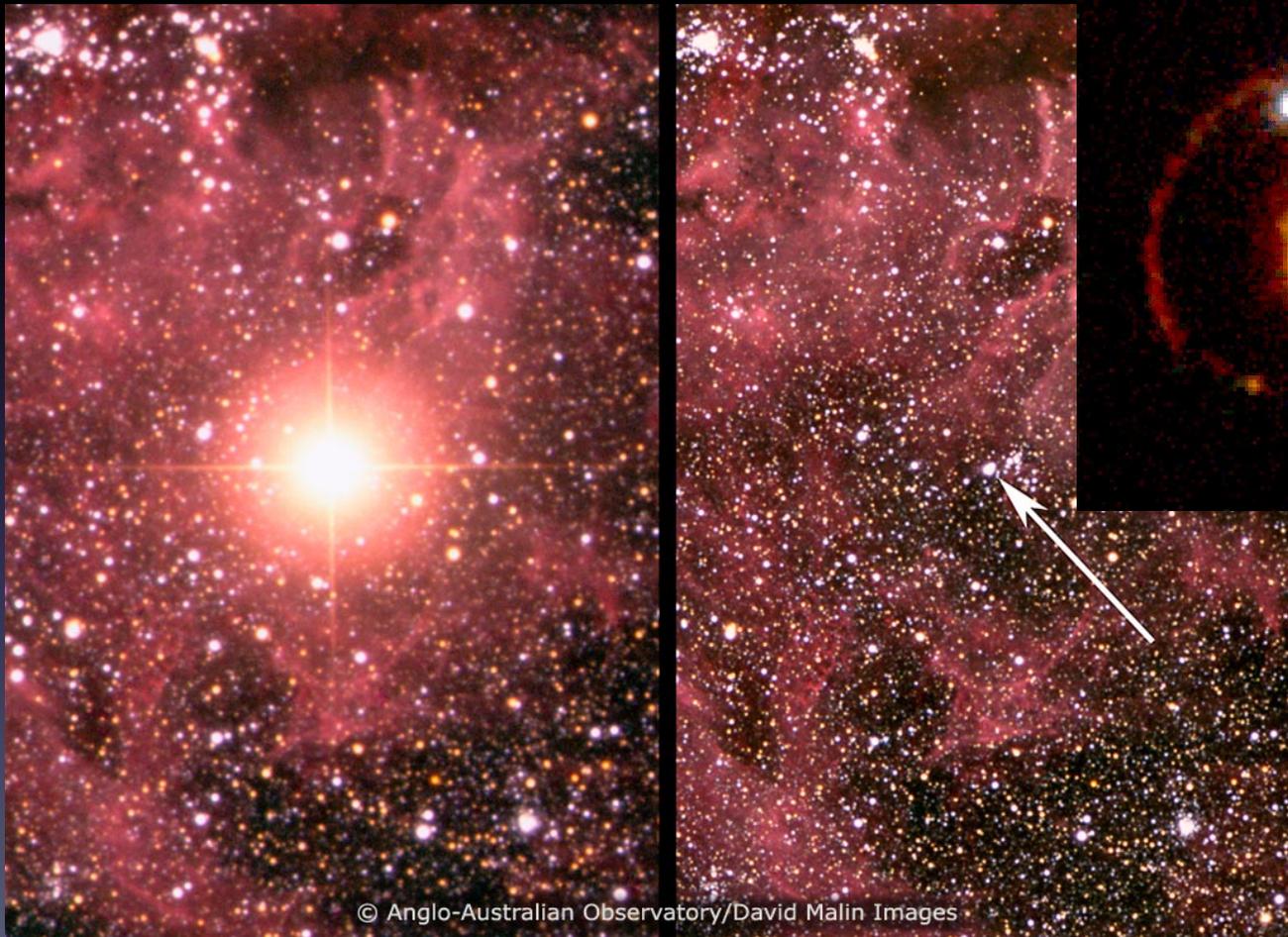


April

New supernova in M82



La dernière grande supernova



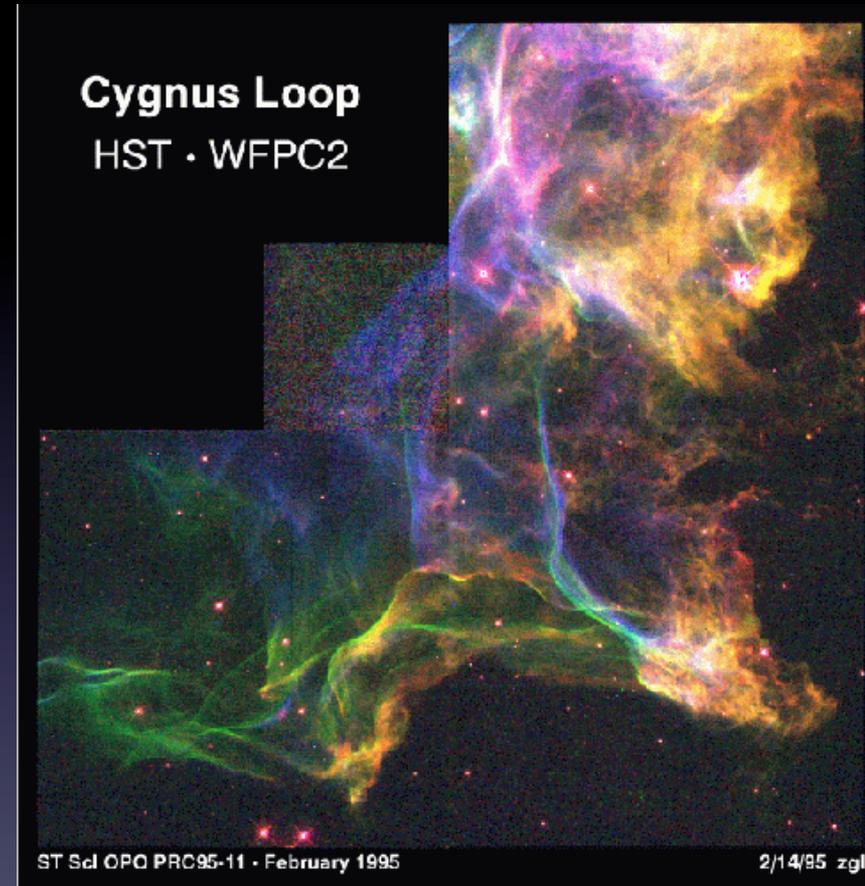
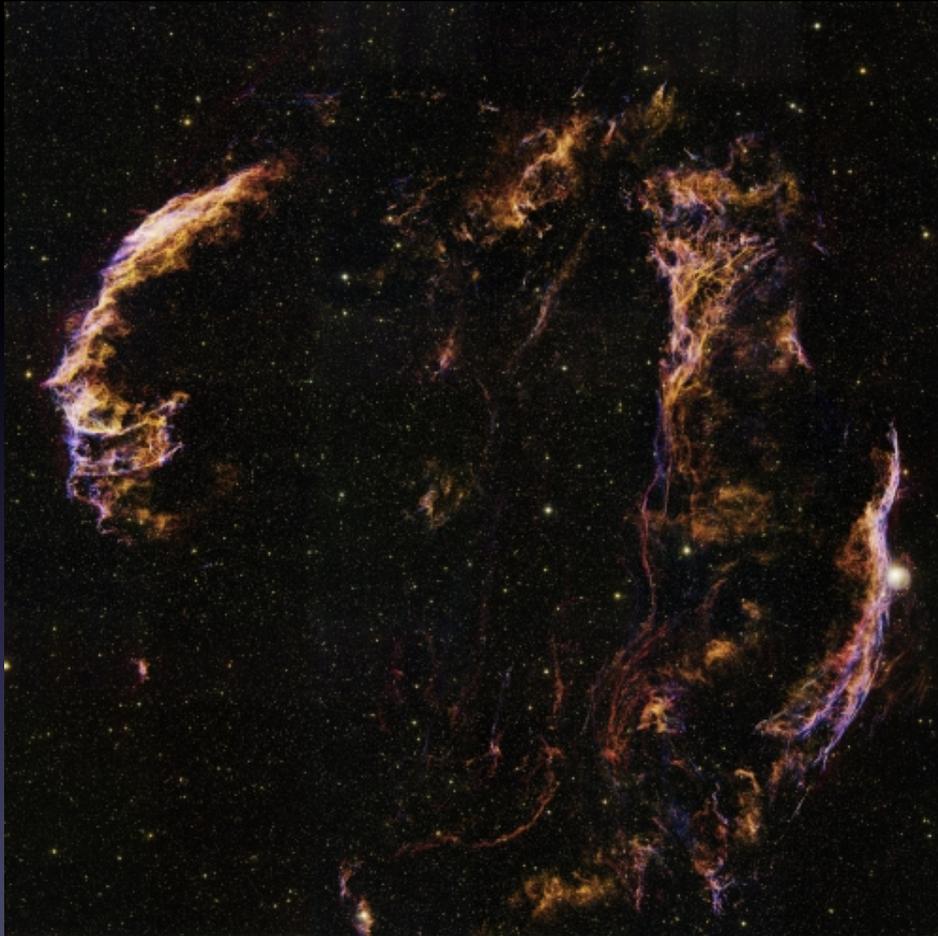
Rémanents de supernovae

- Nébuleuse du crabe: rémanent d'une supernova qui a explosé en 1054.
 - La nébuleuse est en expansion, avec une vitesse de 1450km/s
 - Distance: 2kpc
 - Diamètre: 4×2 arcminutes



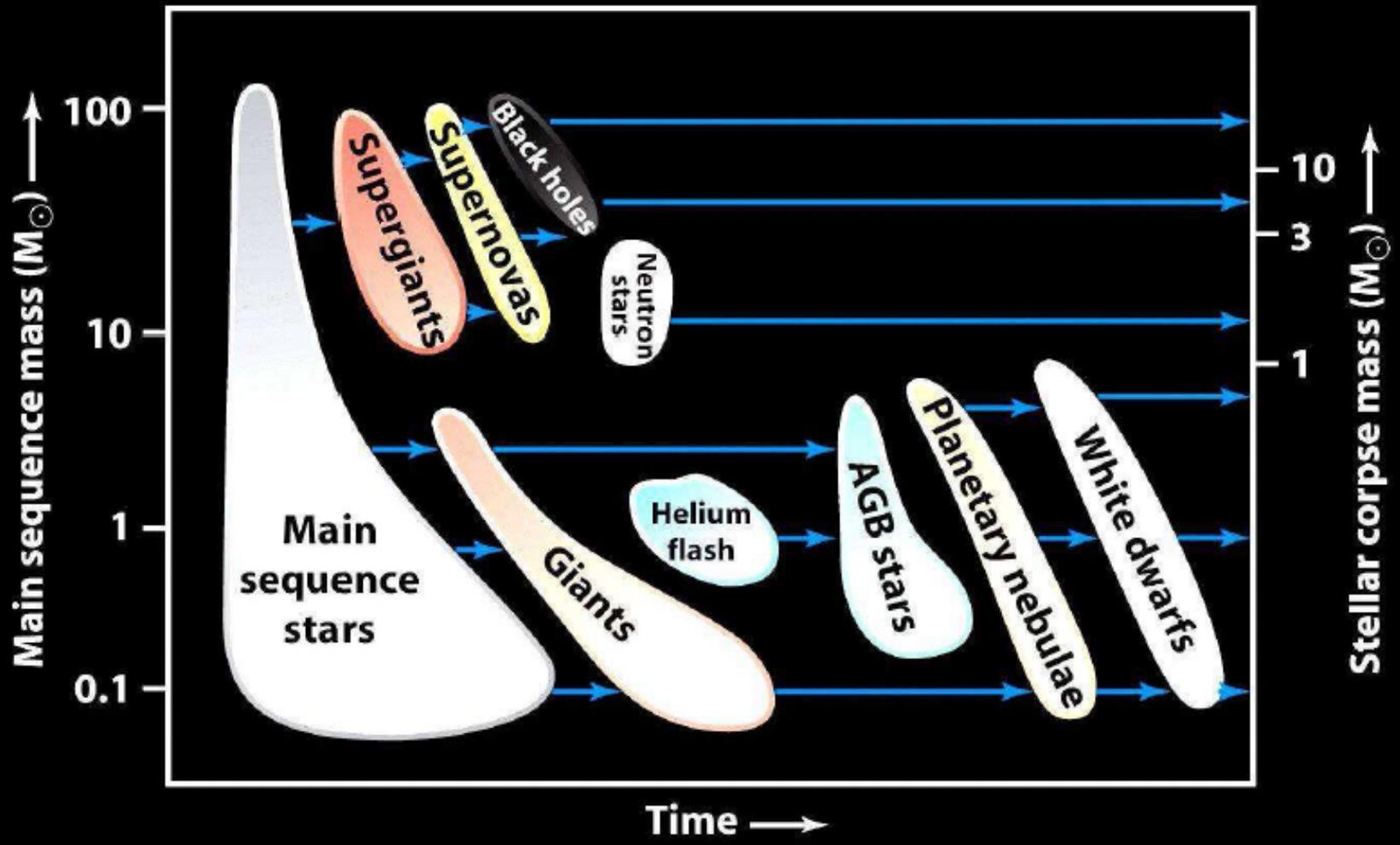
Quel est l'âge de la nébuleuse? ($1 \text{ ua} = 1.5 \times 10^8 \text{ km}$)

Rémanents de supernovae

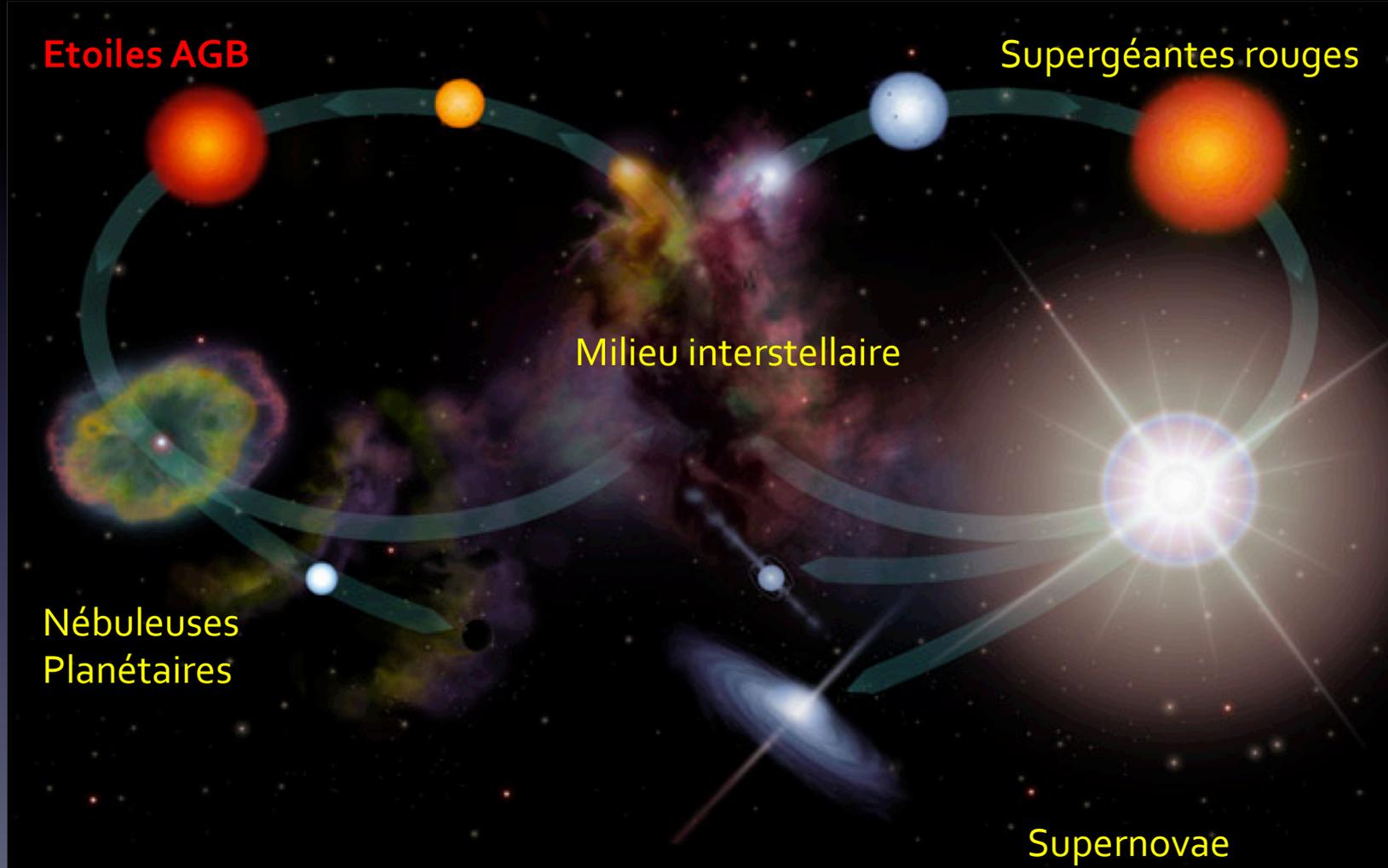


Dentelles du cygne: 15 000 ans. Intéraction avec le milieu interstellaire.

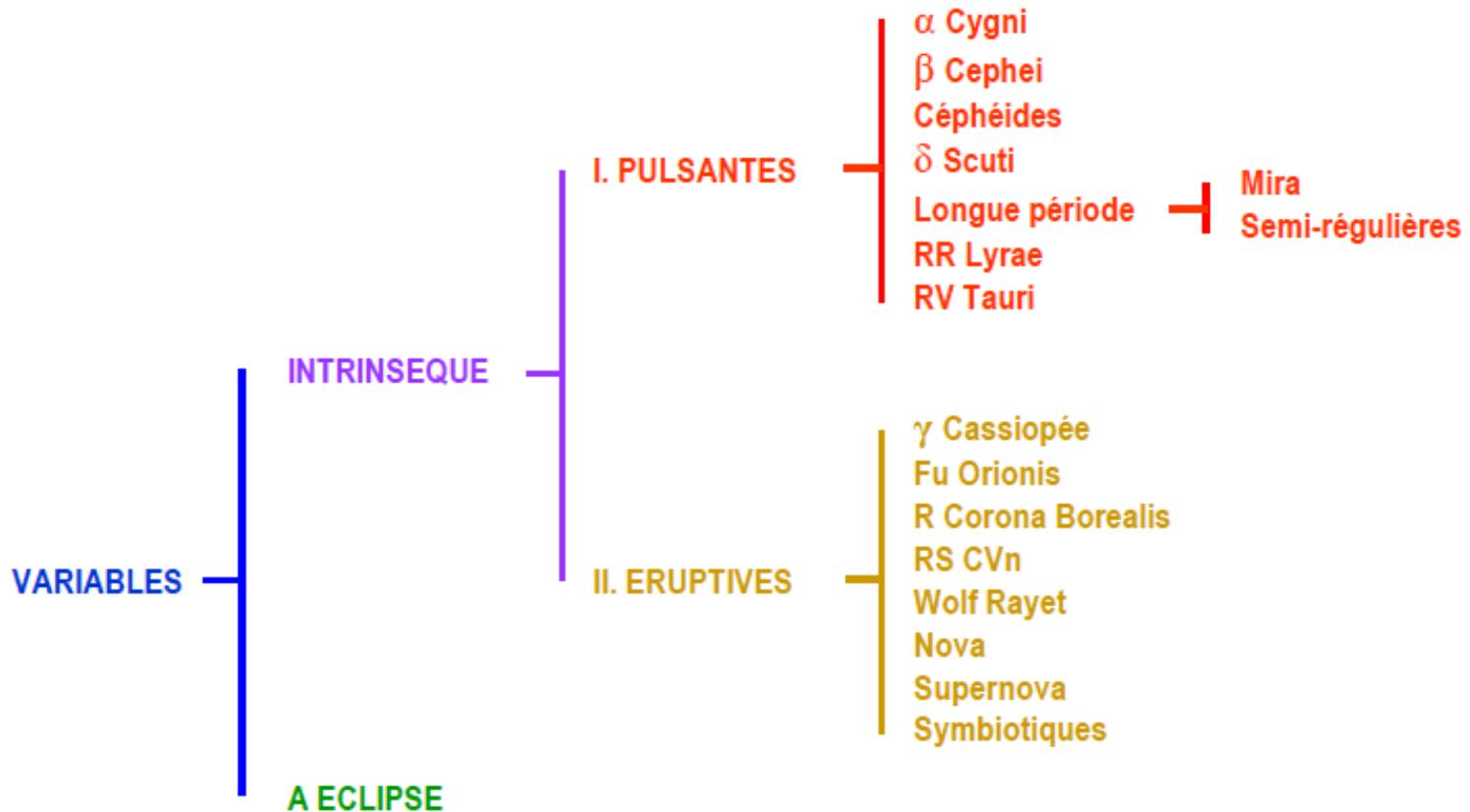
Evolution stellaire : Résumé



La vie des étoiles



Familles des variables ...

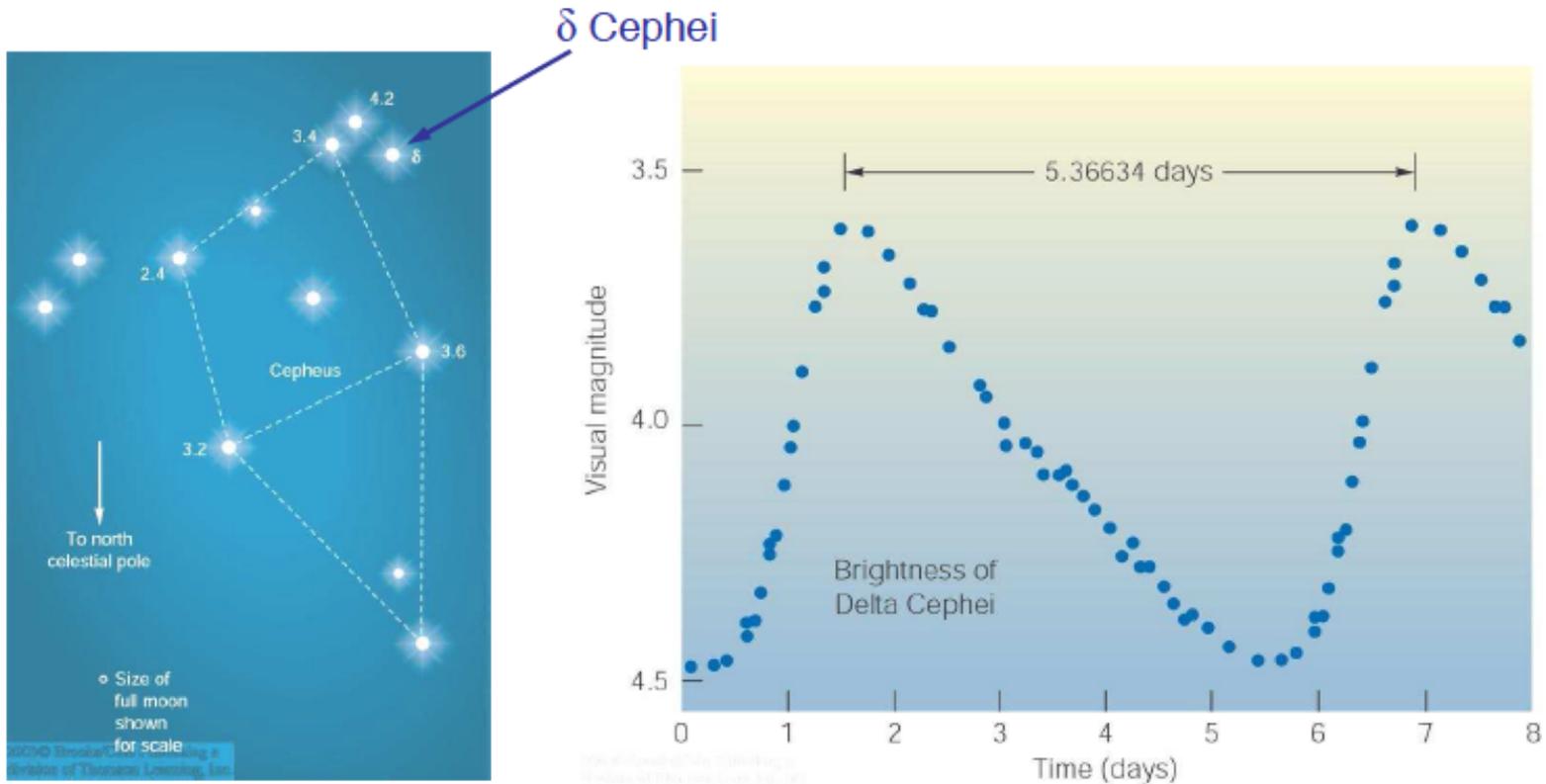


Etoiles variables : Cépheïdes

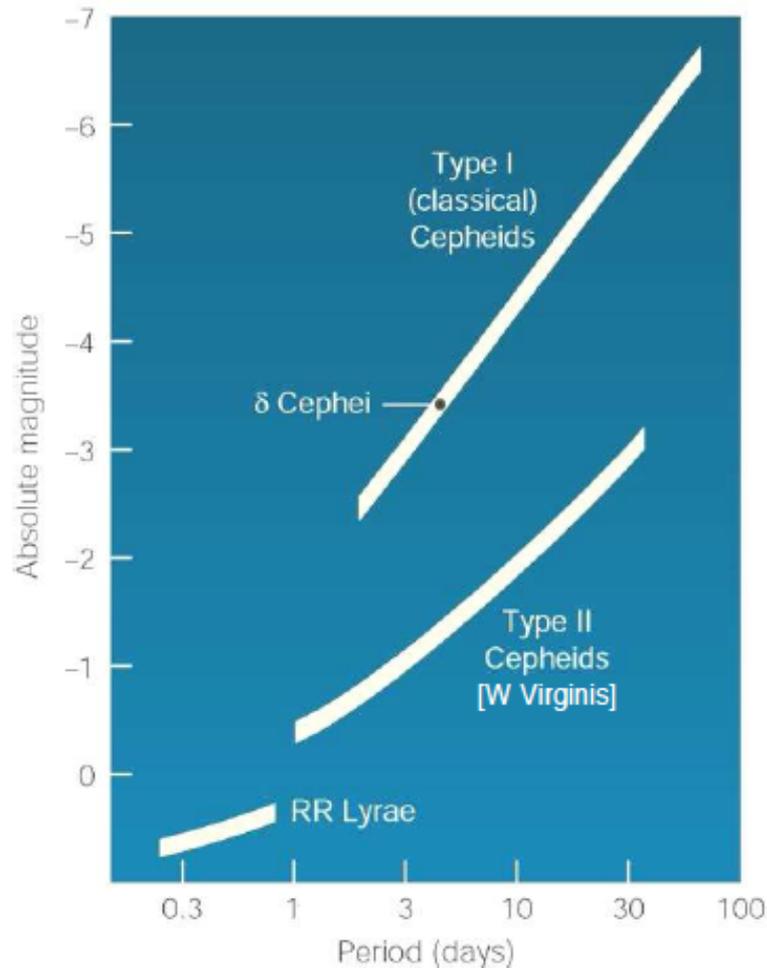
Etoile géante ou supergéante

$$4 M_{\odot} < M < 15 M_{\odot}$$

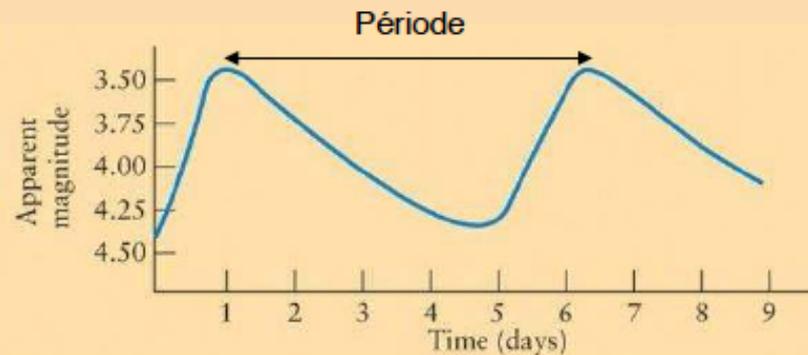
$$100 L_{\odot} < L < 30\,000 L_{\odot} \text{ [Peuvent-êtré identifiées dans d'autres galaxies]}$$



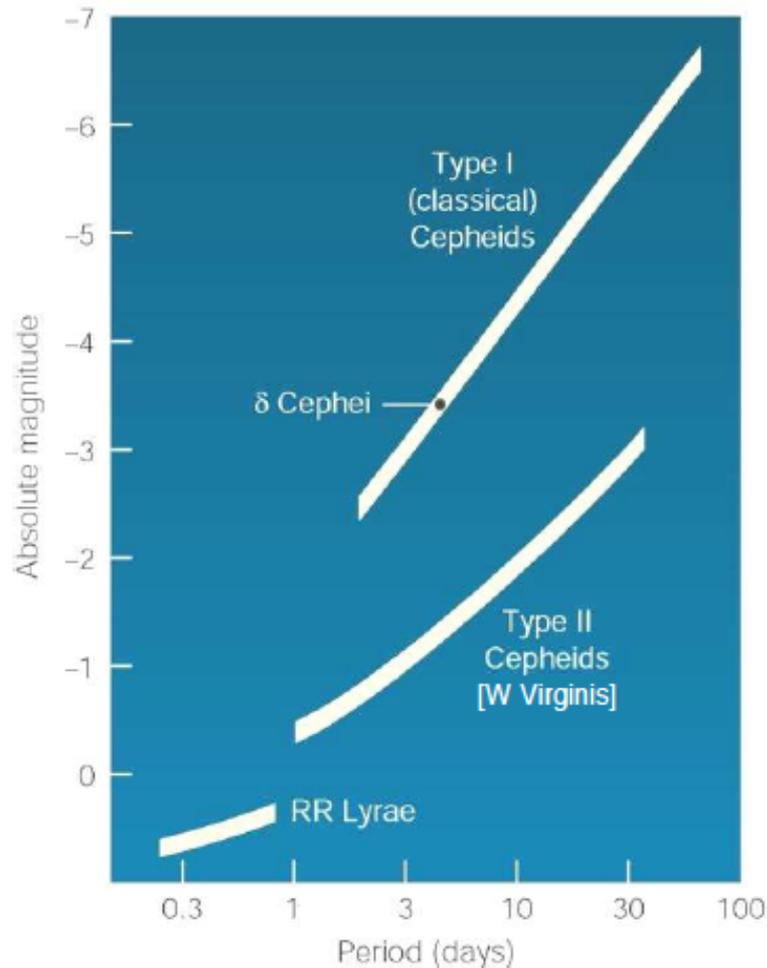
Céphéides : Relation période-luminosité



Détermination de la magnitude absolue à partir de la mesure de la période de variabilité



Céphéides :

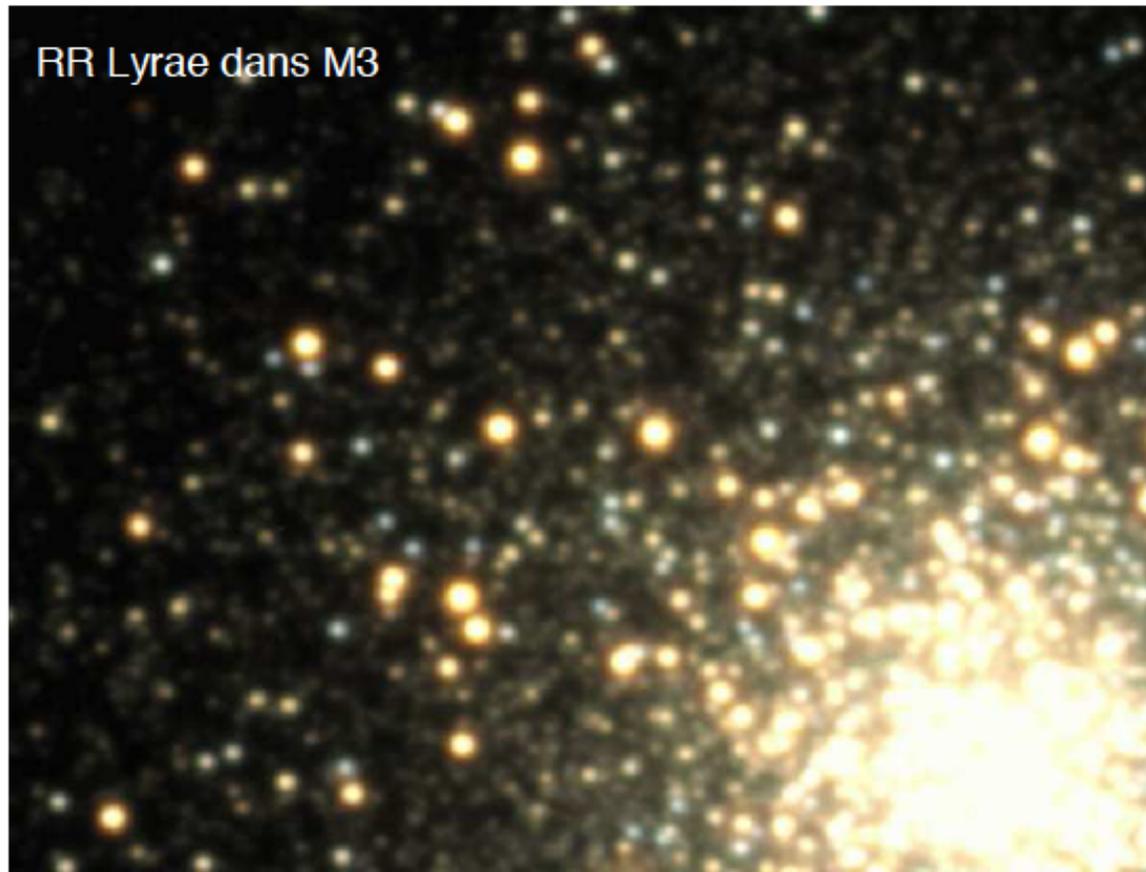


Jusqu'à 30 000 fois plus lumineuses
que le Soleil

Peuvent-être identifiées dans d'autres
galaxies

RR Lyrae

Période de variation de luminosité relativement courte [0.2 à 2 jours], amplitude de 0.3 à 2 magnitudes

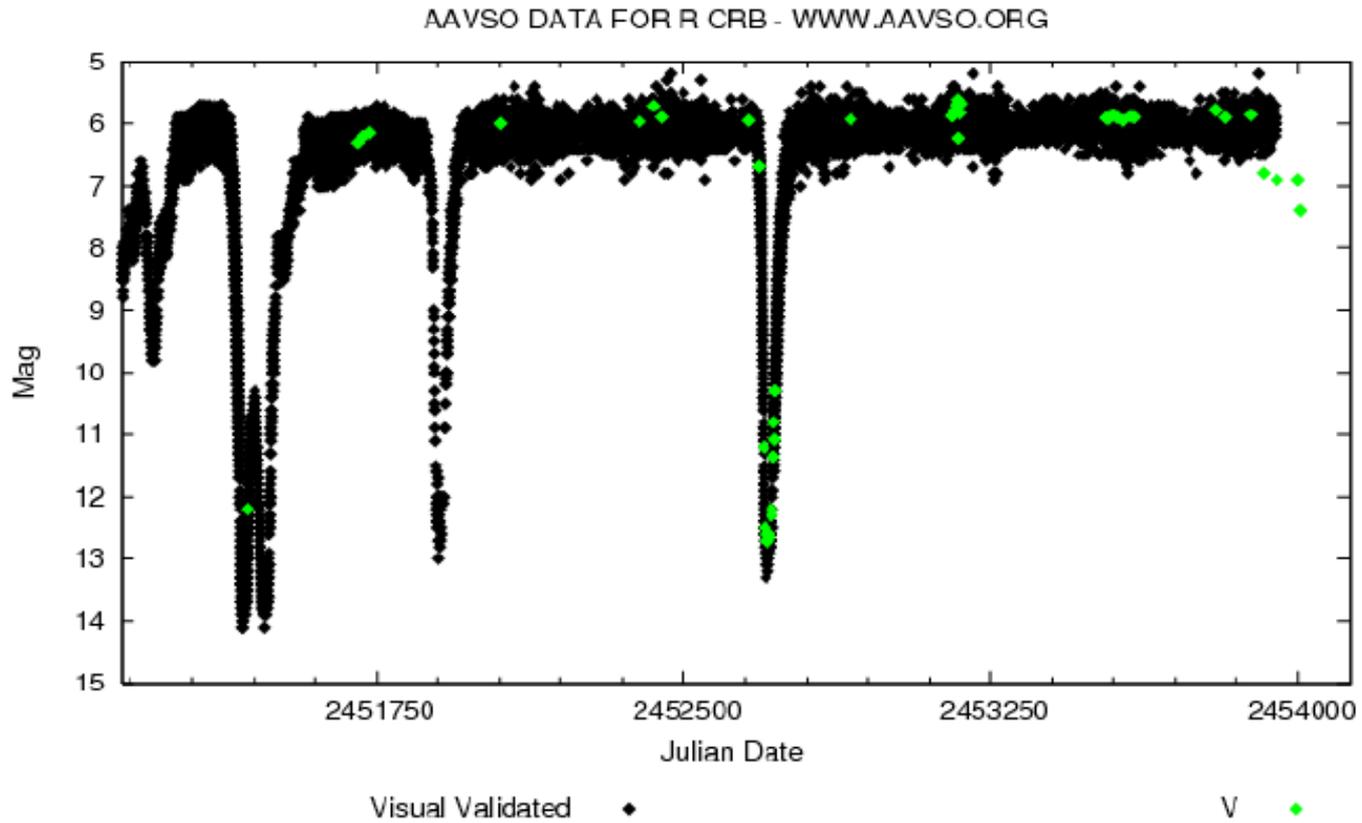


170

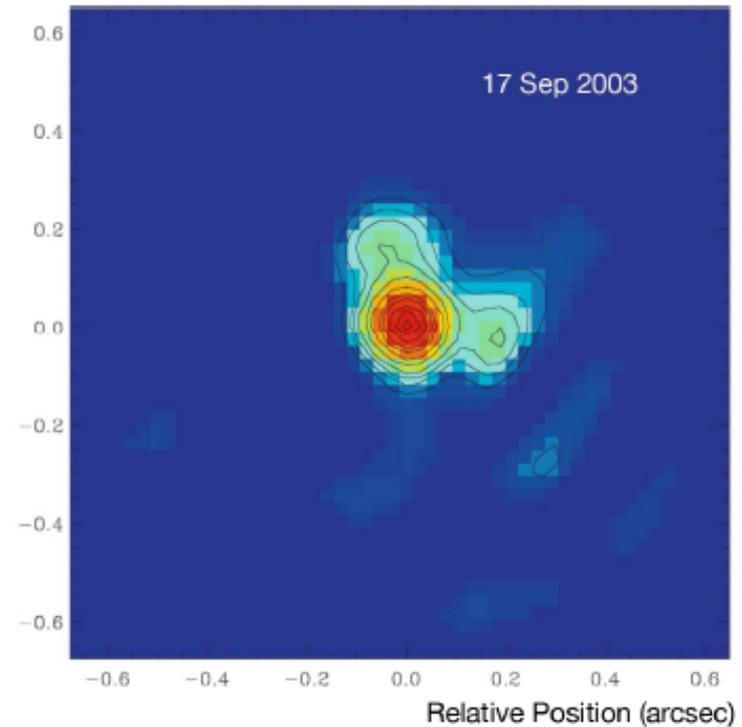
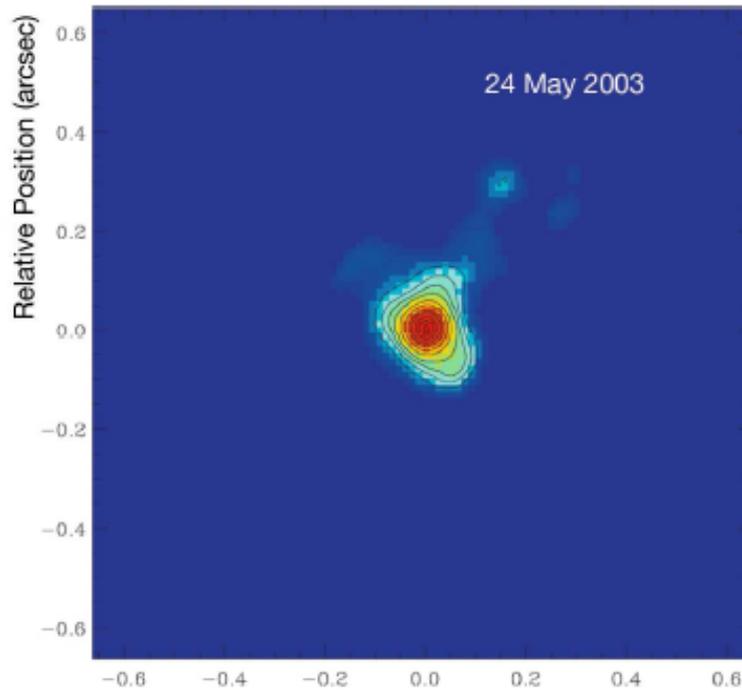
J. Hartman & (Harvard CfA) & K. Stanek (Ohio State U.)

R Corona Borealis

Chute brusque d'éclat, sans périodicité apparente, avec une amplitude pouvant atteindre 8 magnitudes



Etoiles R Corona Borealis



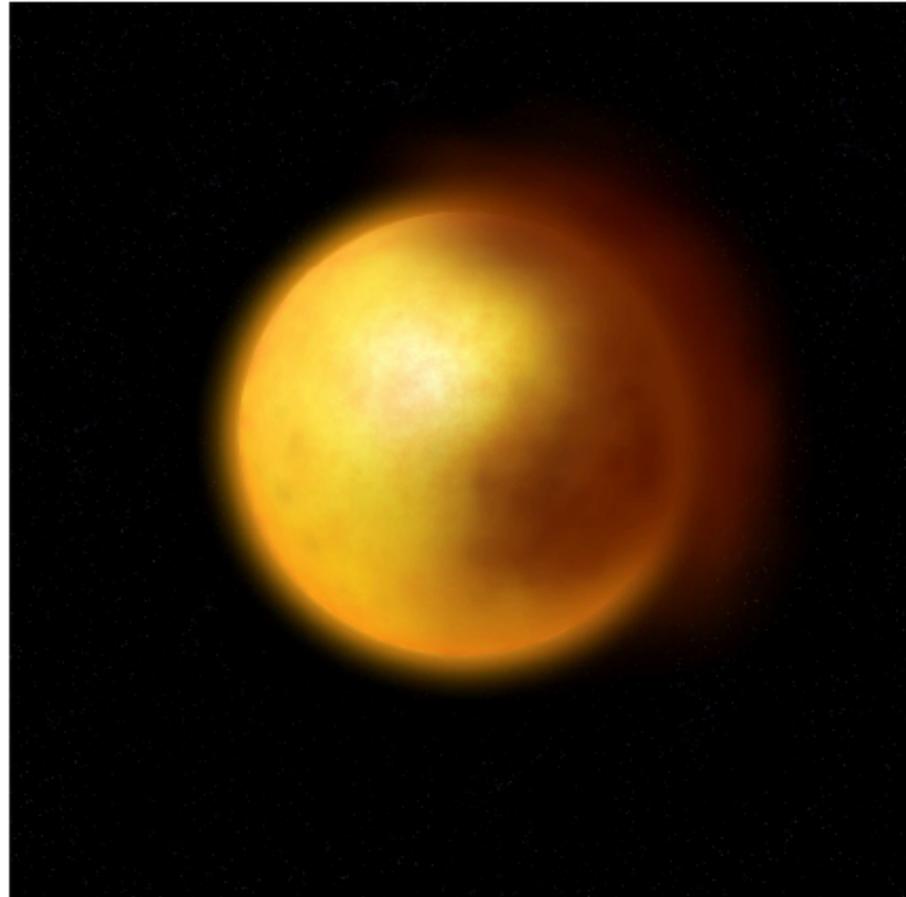
Clouds around RY Sagittarii (NACO/MLT)

ESO Press Photo 34b/07 (3 August 2007)

This image is copyright © ESO. It is released in connection with an ESO press release and may be used by the press on the condition that the source is clearly indicated in the caption.



Etoiles R Corona Borealis



Dust Cloud around a R CrB Star
(Artist's Impression)

ESO Press Photo 34a/07 (3 August 2007)

This image is copyright © ESO. It is released in connection with an ESO press release and may be used by the press on the condition that the source is clearly indicated in the caption.

