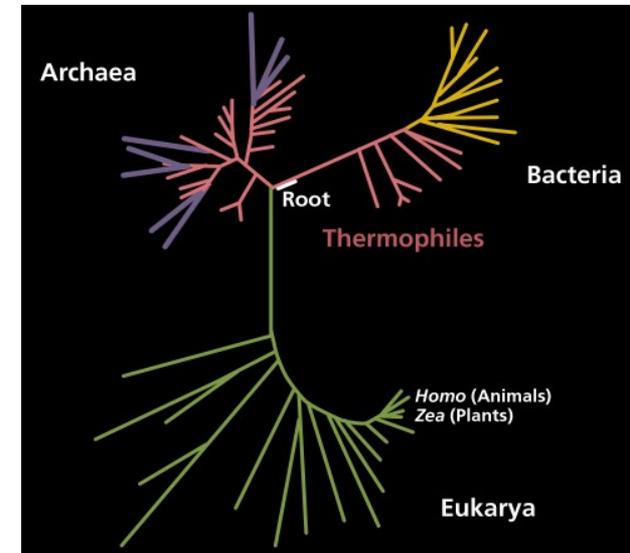




# Exobiologie



Sébastien Rodriguez  
Université Paris 7 / A.I.M.  
[sebastien.rodriquez@cea.fr](mailto:sebastien.rodriquez@cea.fr)



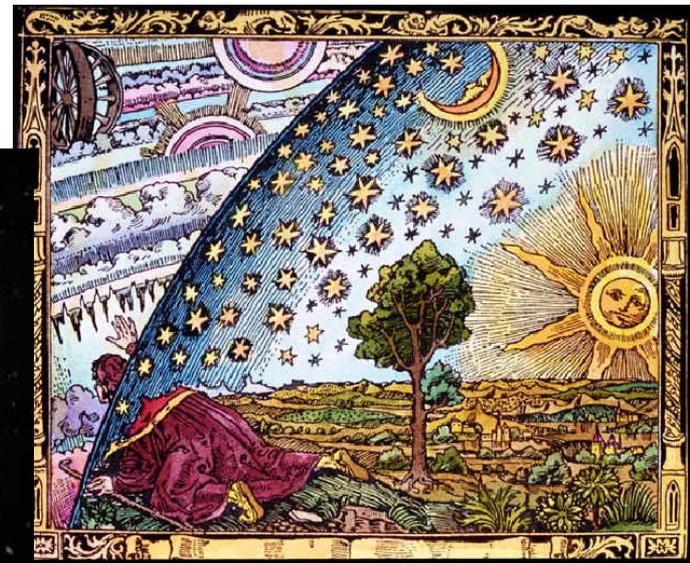


# La formation de l'Univers : la première lumière et l'origine des éléments chimiques



# Origines des éléments chimiques. Une chimie universelle

- Atome et lumière
- Naissance de l'Univers - Big-Bang et nucléosynthèse primordiale
- Nucléosynthèse stellaire et explosive (naissance et mort des étoiles)
- Formation des planètes



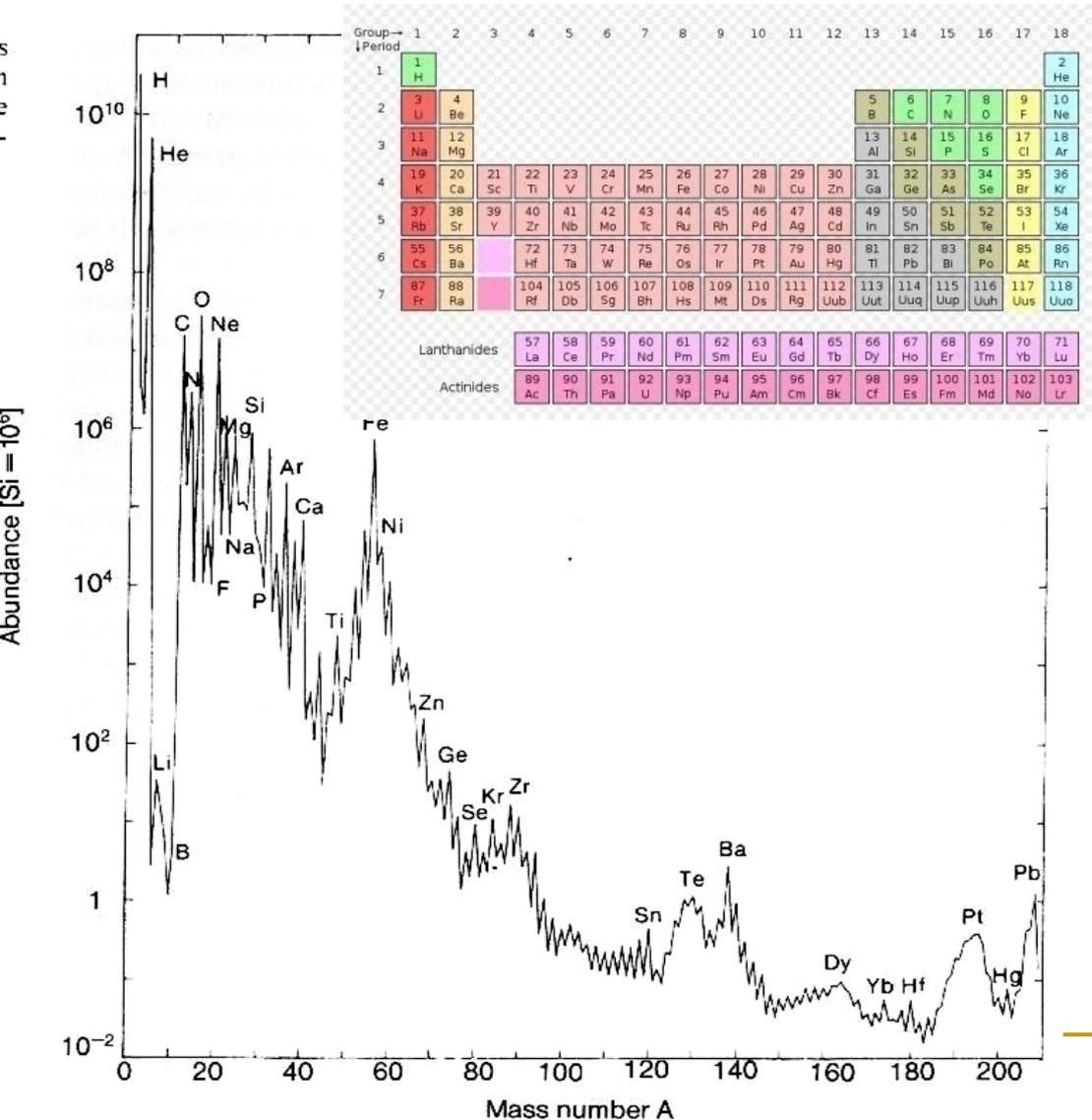
---

## II. Formation primordiale des éléments chimiques : Big-Bang

---



# Abondance des éléments chimiques



## The Most Abundant Elements in the Sun

Element	Percentage by Number of Atoms	Percentage by Mass
Hydrogen	91.0	70.9
Helium	8.9	27.4
Carbon	0.03	0.3
Nitrogen	0.008	0.1
Oxygen	0.07	0.8
Neon	0.01	0.2
Magnesium	0.003	0.06
Silicon	0.003	0.07
Sulfur	0.002	0.04
Iron	0.003	0.1

Mêmes éléments dans tout l'Univers : même chimie, même origine !!!

# L'idée du Big-Bang et de la nucléosynthèse primordiale

*"Nous pouvons concevoir que l'espace a commencé avec l'atome primitif et que le commencement de l'espace a marqué le commencement du temps." G.Lemaître*

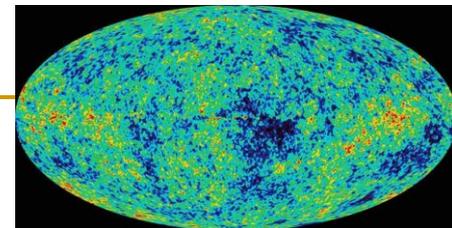
**1927.** George Lemaître : Univers en expansion  $\Rightarrow$  "atome originel", sphère où toute la matière et l'énergie de l'Univers y étaient comprimées, instable  $\Rightarrow$  explosion il y a env. 15 milliards d'années, donnant lieu à l'univers que nous connaissons actuellement...

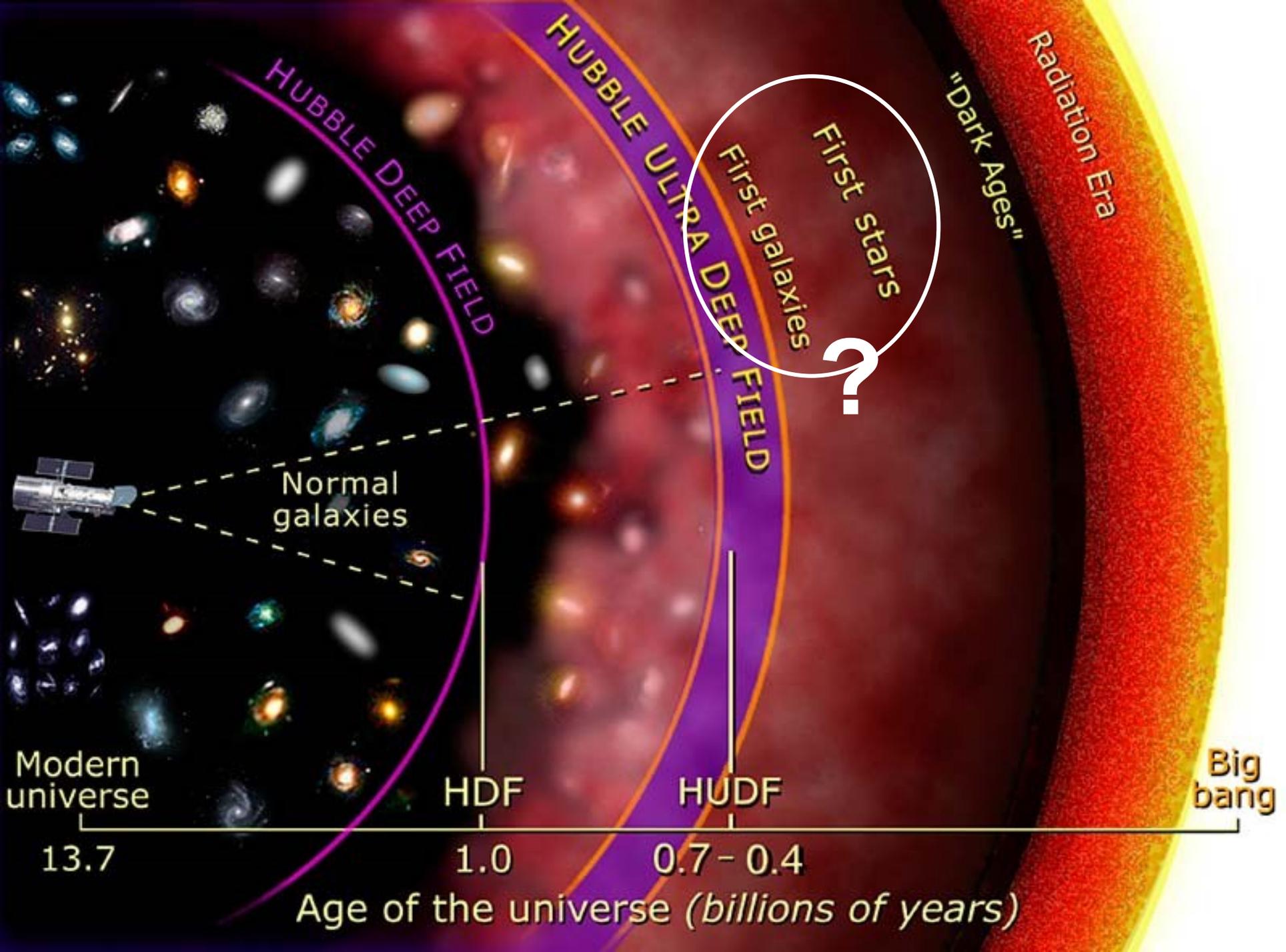
**1929.** Edwin Hubble : confirmation de l'expansion de l'Univers, en étudiant les étoiles et les galaxies à travers le premier grand télescope américain. RedShift  $\Rightarrow$  éloignement des galaxies à une vitesse directement proportionnelle à leur distance (loi de Hubble)

**1948.** George Gamow : différents éléments chimiques observés aujourd'hui auraient été générés juste après cette explosion originelle, à un moment où la température et la densité étaient extrêmement élevées

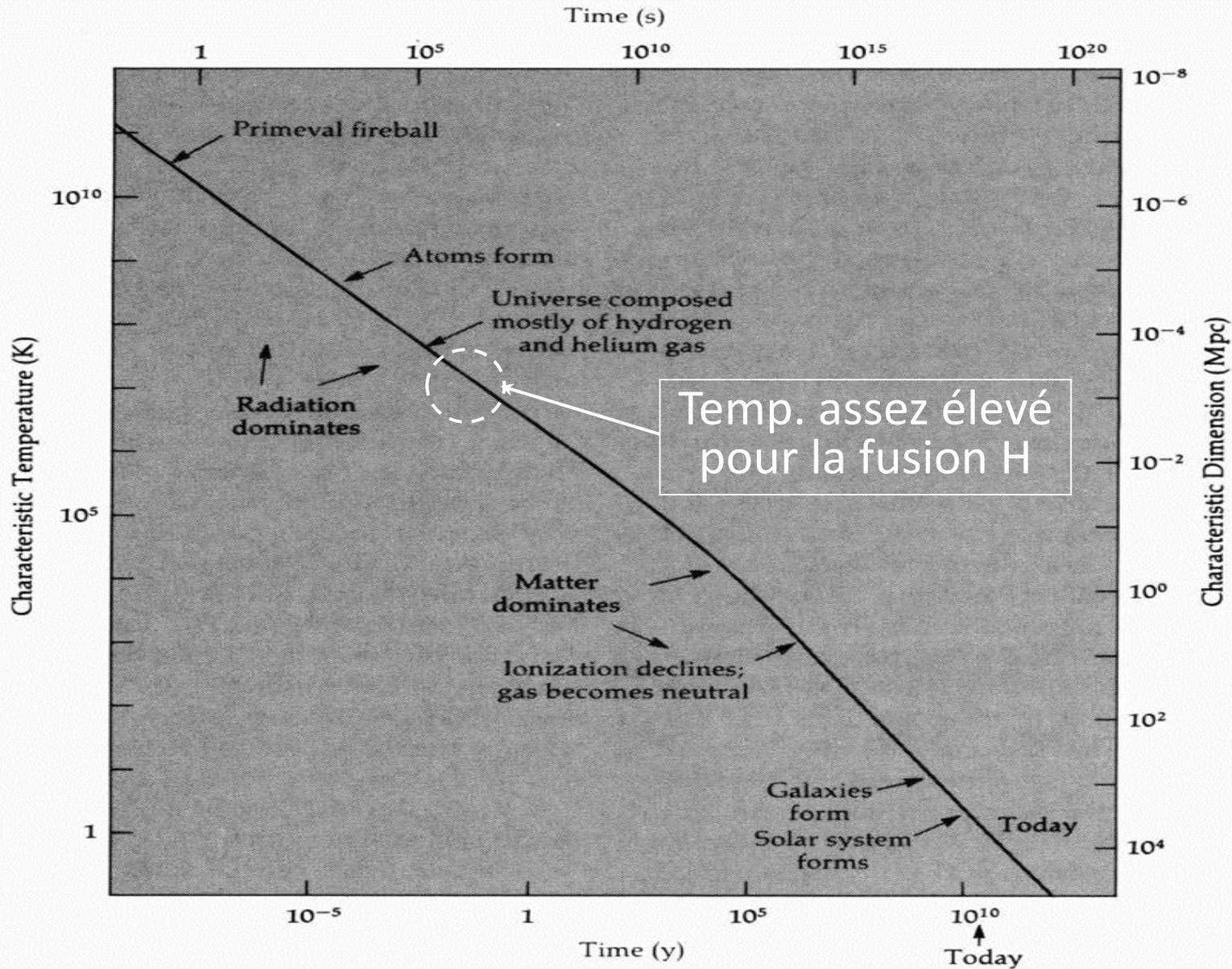
**1949.** Fred Hoyle : invente l'expression "Big Bang", histoire de tourner en dérision l'idée de cette explosion originelle ; soutien l'idée de la nucléosynthèse stellaire

**1964.** Arno Penzias et Richard Wilson (Nobel 1978) : découverte du rayonnement cosmologique, aussi appelé "rayonnement fossile" qui viendra confirmer la théorie du "Big Bang"  $\Rightarrow$  satellite COBE en 1989 (Cosmic Background Explorer)





# Évolution de la température de l'Univers



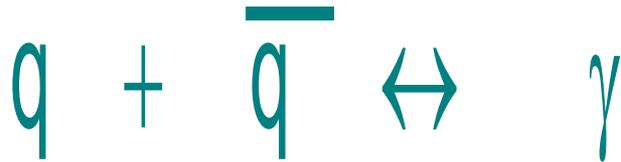
---

# Histoire de l'Univers

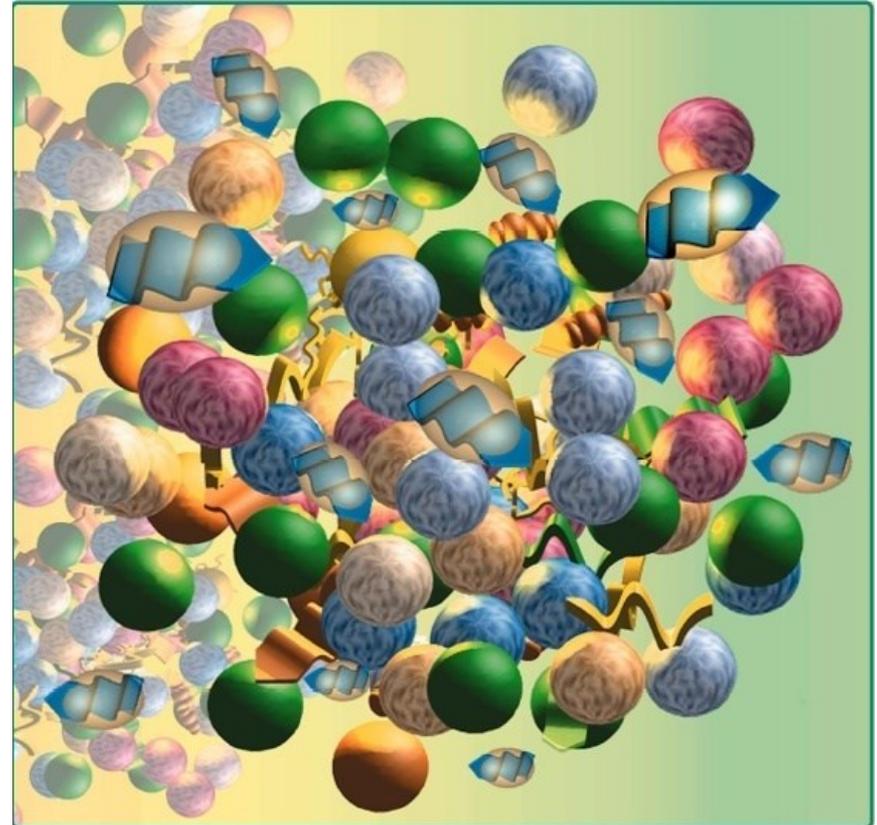
- Quand l'Univers était + jeune que 380 000 ans, il était si chaud que la force électromagnétique ne pouvait maintenir lier les atomes  $\Rightarrow$  noyaux et électrons libre.
  - Quand l'Univers était + jeune que 1 s, il était si chaud que la force nucléaire forte ne pouvait maintenir lié le noyau : protons et neutrons libres.
-

# 1) La matière gagne

- 0.1 ns,  $T = 10^{15}$  K,  $10^2$  GeV
  - 4 forces séparées
  - soupe de quarks et anti-quarks
  - matière et antimatière s'annihilent en lumière



- 1 quark sur 1 milliard survit



## 2) Ça s'agite !!!

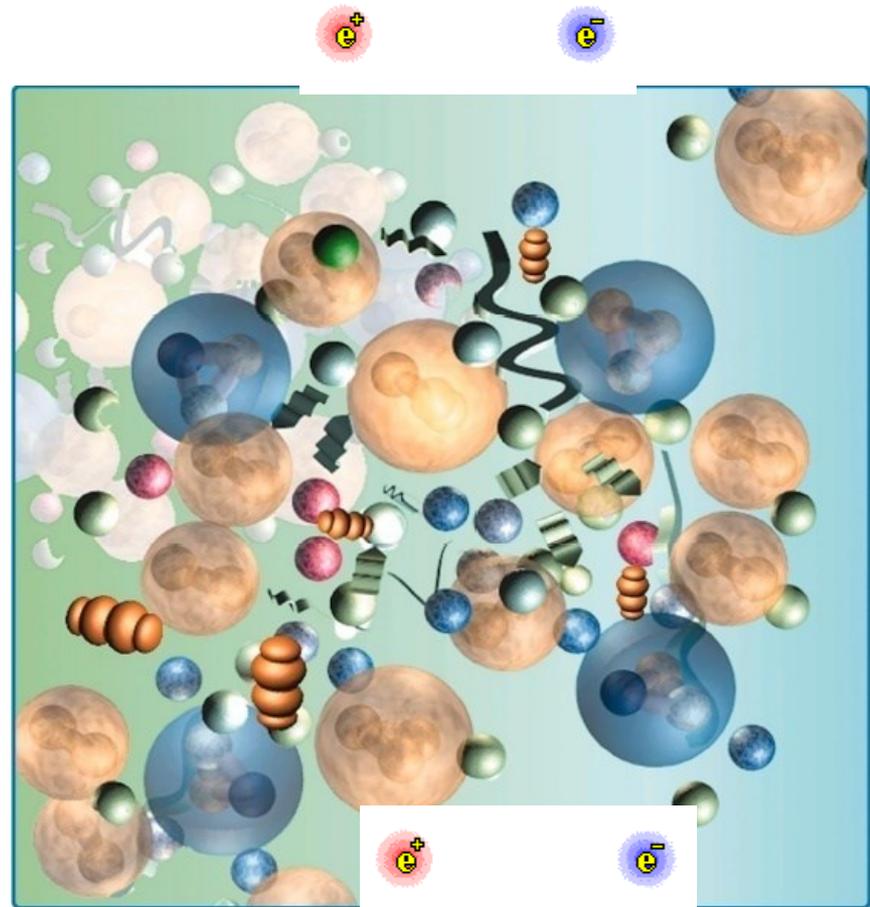
- 0.1 ms,  $T = 10^{13}$  K, 1 GeV
  - Univers visible = taille syst. solaire
  - quarks se combinent en p et n :  $m_p c^2 = 938$  MeV
  - 50 % p - 50 % n



- 1 s,  $T = 10^{10}$  K, 1 MeV
  - les neutrinos s'échappent



- neutrons se désintègrent :  $\approx 85\%$  p et  $15\%$  n



# 3) Formation des noyaux

■ 100 s,  $T = 10^9$  K, 0.1 MeV

□ p et n peuvent se combiner en D quand  $kT < \text{MeV}$

□ Lent :  $p + n \rightarrow {}^2\text{H} + \gamma = D + \gamma$

□ Rapide :  ${}^2\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + n \rightarrow {}^3\text{H} + p$

${}^3\text{H} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + n$

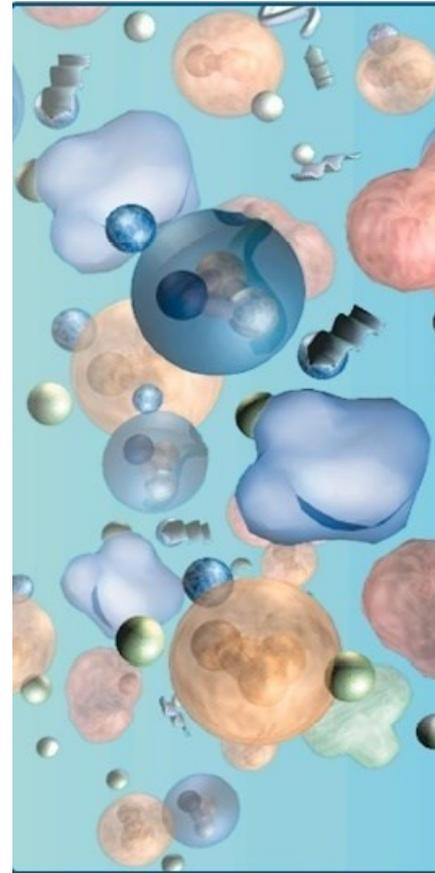
${}^3\text{He} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + p$

⇒ 24-28 % He en masse

□ pas de noyau stable  $A = 5$  (He+p) et  $A = 8$  (He+He)

□ conditions de formation OK brièvement pour  ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^9\text{Be}$ ,  ${}^{10}\text{B}$

□ électrons en liberté



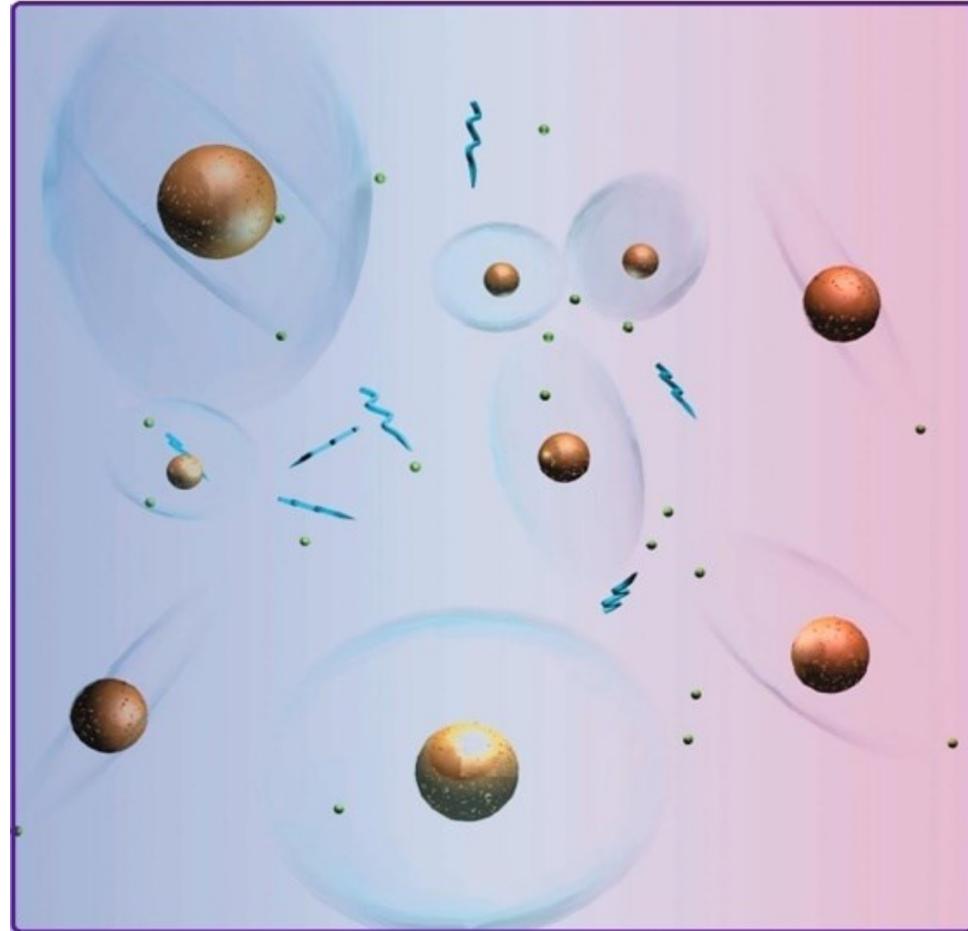
$p + n$	$\rightarrow$	$D + \gamma$
$D + n$	$\rightarrow$	${}^3\text{H} + \gamma$
$D + p$	$\rightarrow$	${}^3\text{He} + \gamma$
$D + D$	$\rightarrow$	${}^3\text{H} + p$
$D + D$	$\rightarrow$	${}^3\text{He} + n$
$D + D$	$\rightarrow$	${}^4\text{He} + \gamma$
${}^3\text{H} + p$	$\rightarrow$	${}^4\text{He} + \gamma$
${}^3\text{He} + n$	$\rightarrow$	${}^3\text{H} + p$
${}^3\text{He} + n$	$\rightarrow$	${}^4\text{He} + \gamma$
${}^3\text{H} + D$	$\rightarrow$	${}^4\text{He} + n$
${}^3\text{He} + D$	$\rightarrow$	${}^4\text{He} + p$
${}^3\text{He} + {}^3\text{He}$	$\rightarrow$	${}^4\text{He} + 2p$
${}^4\text{He} + D$	$\rightarrow$	${}^6\text{Li} + \gamma$
${}^4\text{He} + {}^3\text{H}$	$\rightarrow$	${}^7\text{Li} + \gamma$
${}^4\text{He} + {}^3\text{He}$	$\rightarrow$	${}^7\text{Be} + \gamma$
${}^6\text{Li} + n$	$\rightarrow$	${}^7\text{Li} + \gamma$
${}^6\text{Li} + p$	$\rightarrow$	${}^7\text{Be} + \gamma$
${}^7\text{Li} + p$	$\rightarrow$	${}^4\text{He} + \gamma$
${}^7\text{Be} + n$	$\rightarrow$	${}^7\text{Li} + p$
${}^7\text{Be} + e^-$	$\rightarrow$	${}^7\text{Li} + \gamma$

The Most Abundant Elements in the Sun

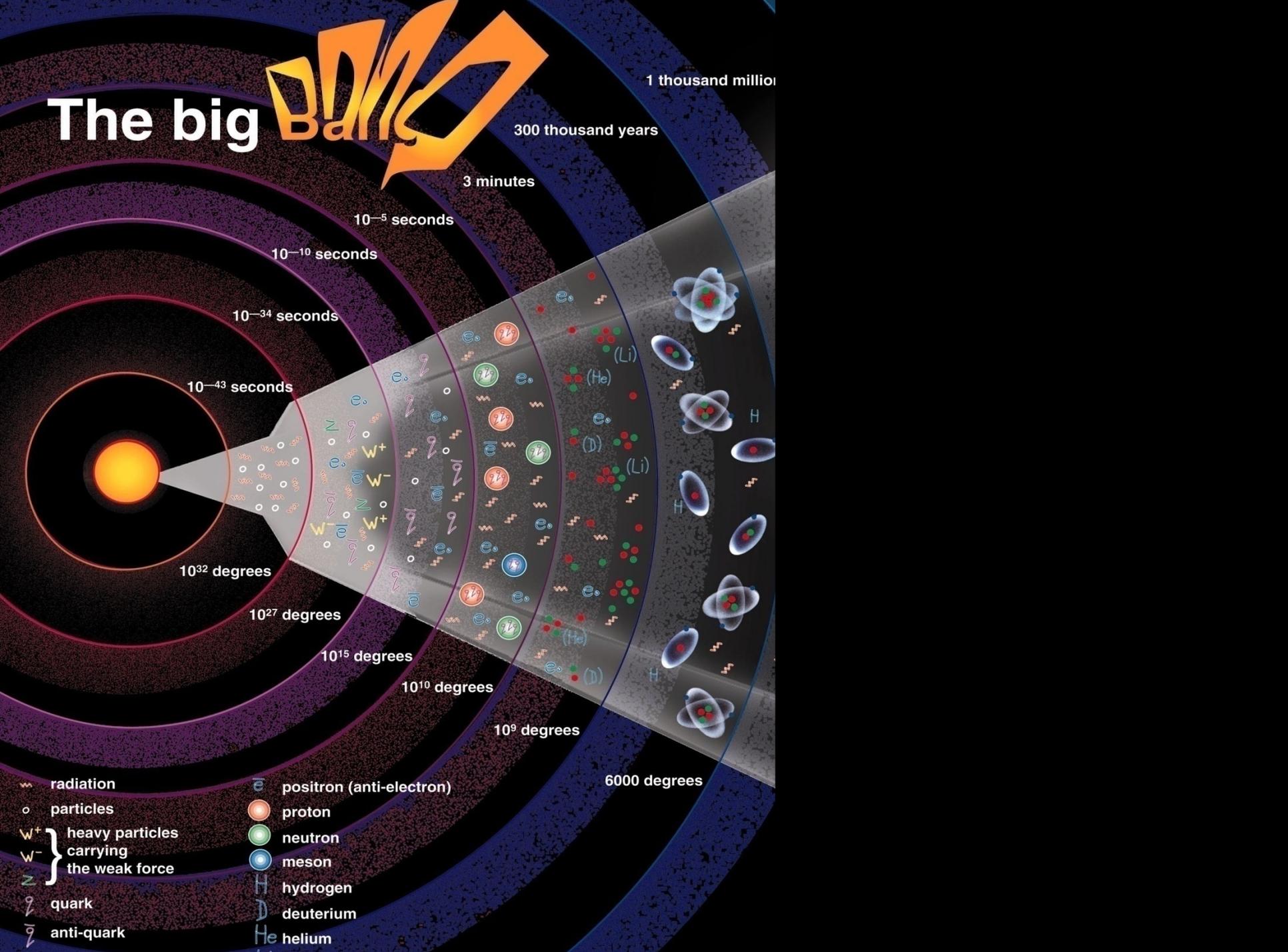
Element	Percentage by Number of Atoms	Percentage by Mass
Hydrogen	91.0	70.9
Helium	8.9	27.4

## 4) Apparition des atomes

- 380 000 ans,  $T = 6000-4000$  K
- électrons rejoignent les noyaux
- Emission/Absorption  $> 1$
- le brouillard se dissipe, la lumière s'échappe  $\Rightarrow$  fond diffus cosmologique



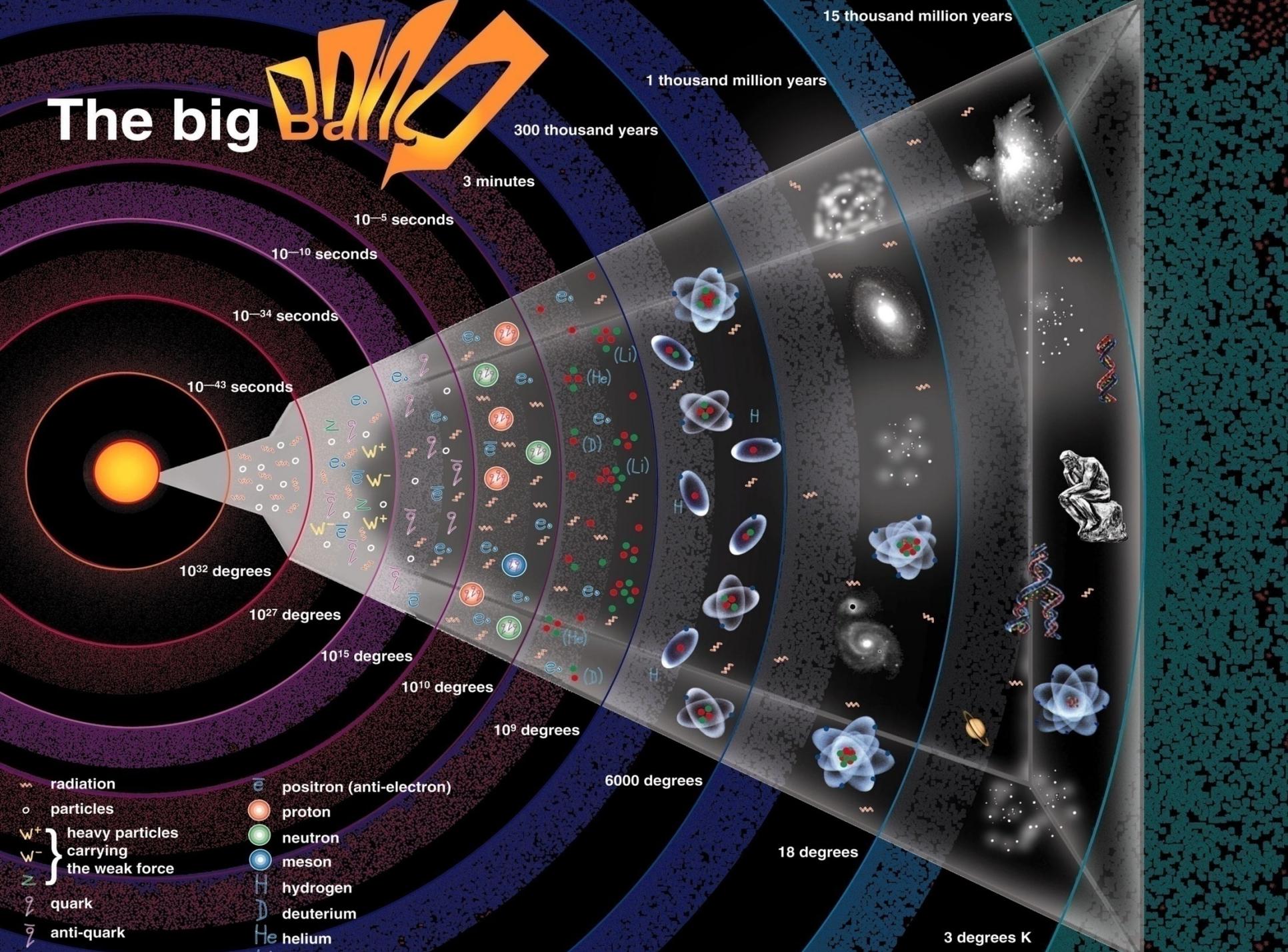
# The big Bang



- radiation
- particles
- $W^+$  } heavy particles carrying the weak force
- $W^-$  }
- $Z$  }
- quark
- anti-quark

- positron (anti-electron)
- proton
- neutron
- meson
- $H$  hydrogen
- $D$  deuterium
- $He$  helium

# The big Bang



15 thousand million years

1 thousand million years

300 thousand years

3 minutes

$10^{-5}$  seconds

$10^{-10}$  seconds

$10^{-34}$  seconds

$10^{-43}$  seconds

$10^{32}$  degrees

$10^{27}$  degrees

$10^{15}$  degrees

$10^{10}$  degrees

$10^9$  degrees

6000 degrees

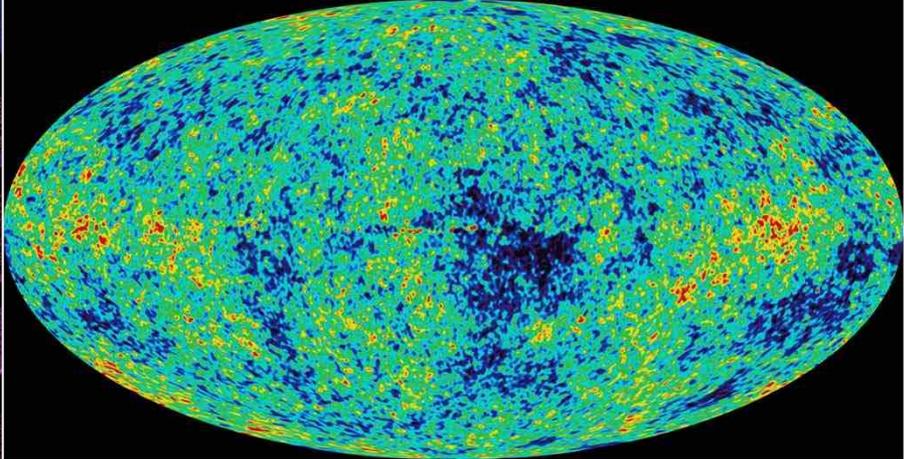
18 degrees

3 degrees K

- radiation
- particles
- $W^+$  } heavy particles carrying the weak force
- $W^-$  }
- $Z$  }
- quark
- anti-quark

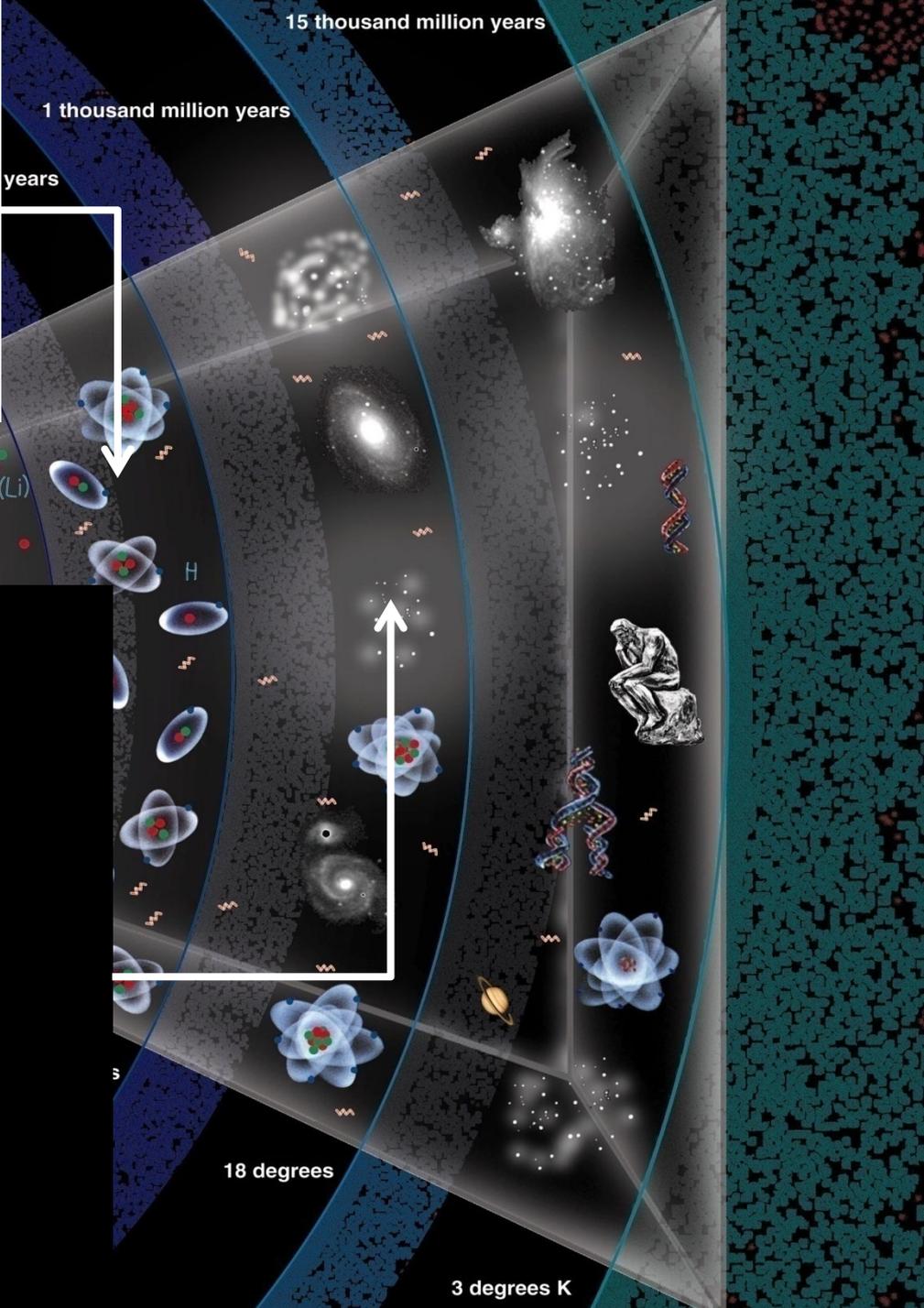
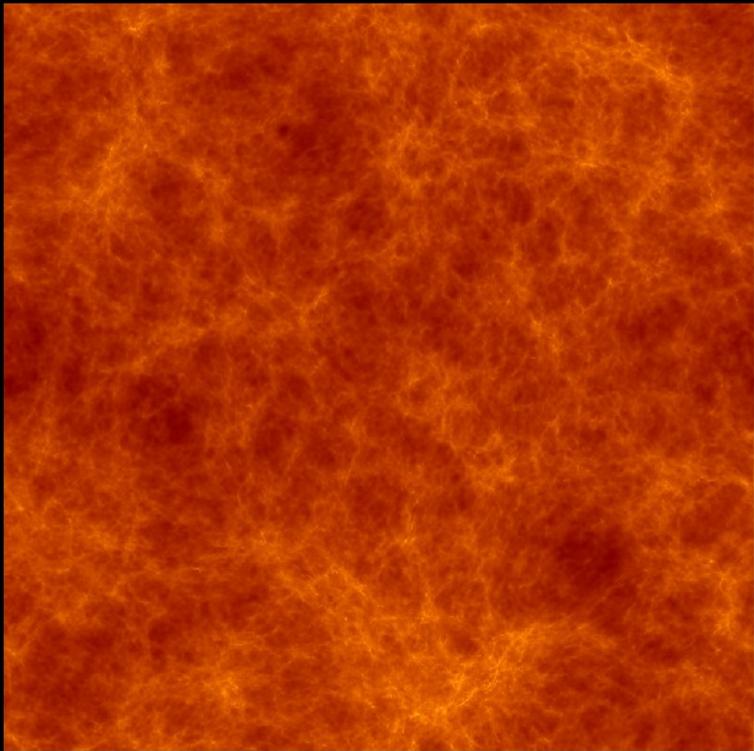
- positron (anti-electron)
- proton
- neutron
- meson
- $H$  hydrogen
- $D$  deuterium
- $He$  helium





$10^{-34}$  seconds

$10^{-43}$  seconds



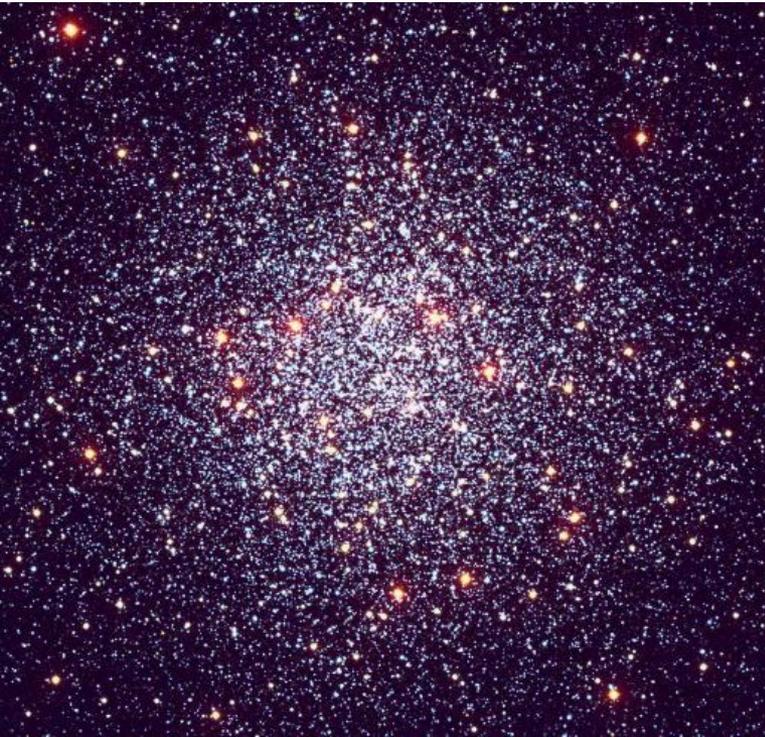
---

# III. Formation « secondaire » des éléments chimiques dans les étoiles

---

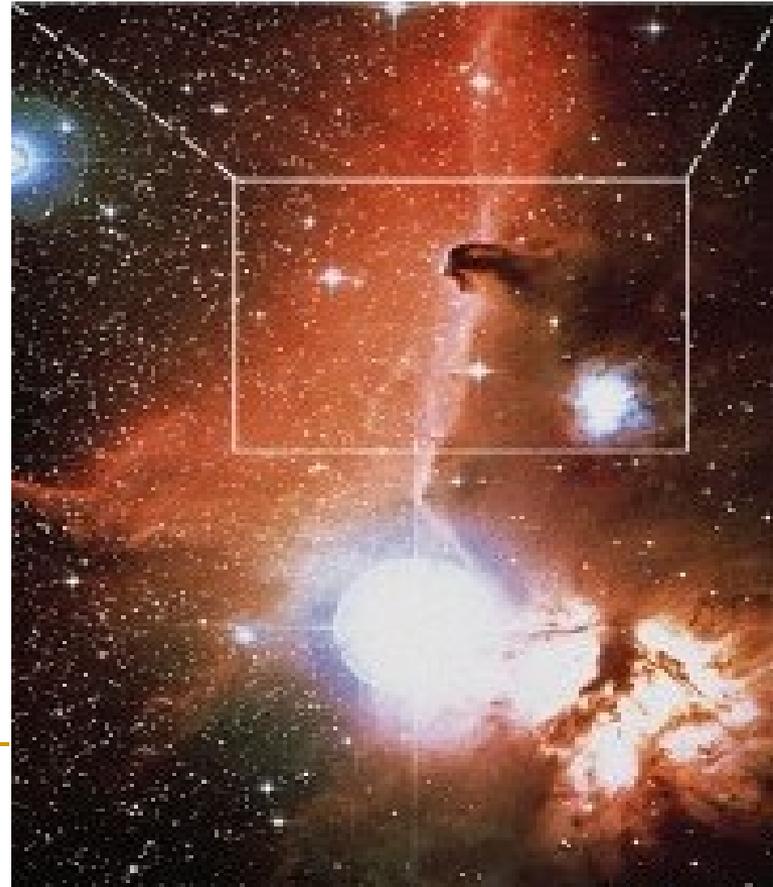
---

# Illa: Formation et évolution des étoiles

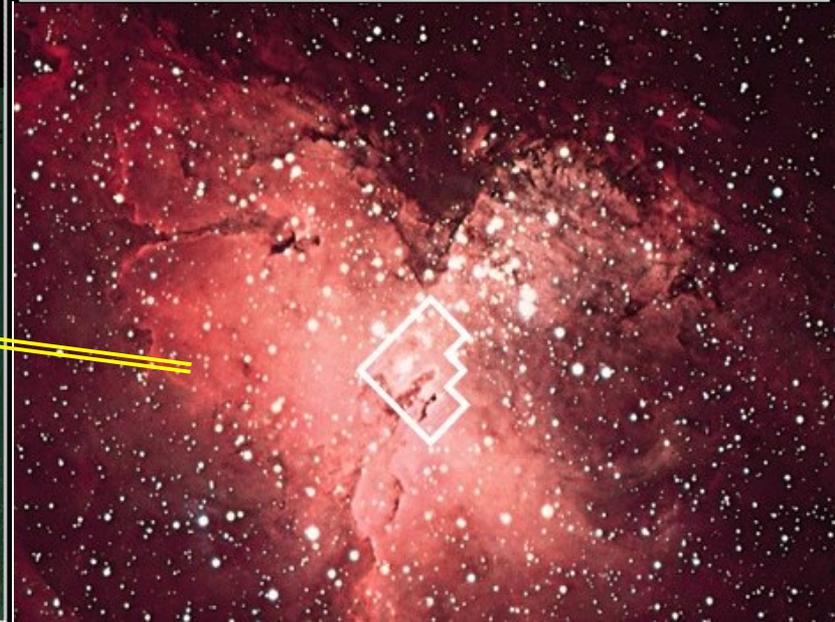
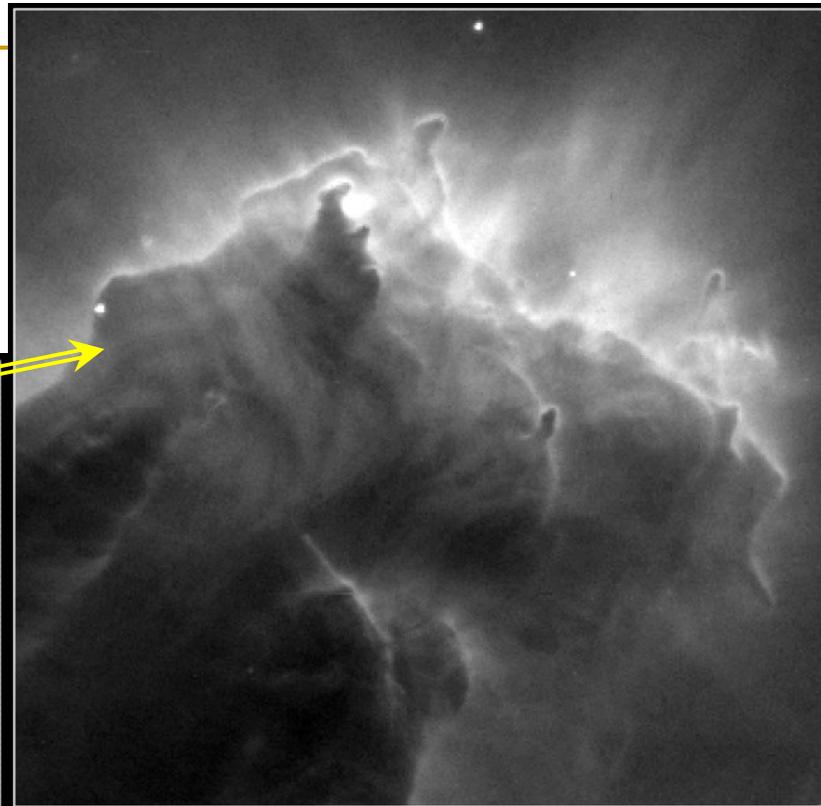
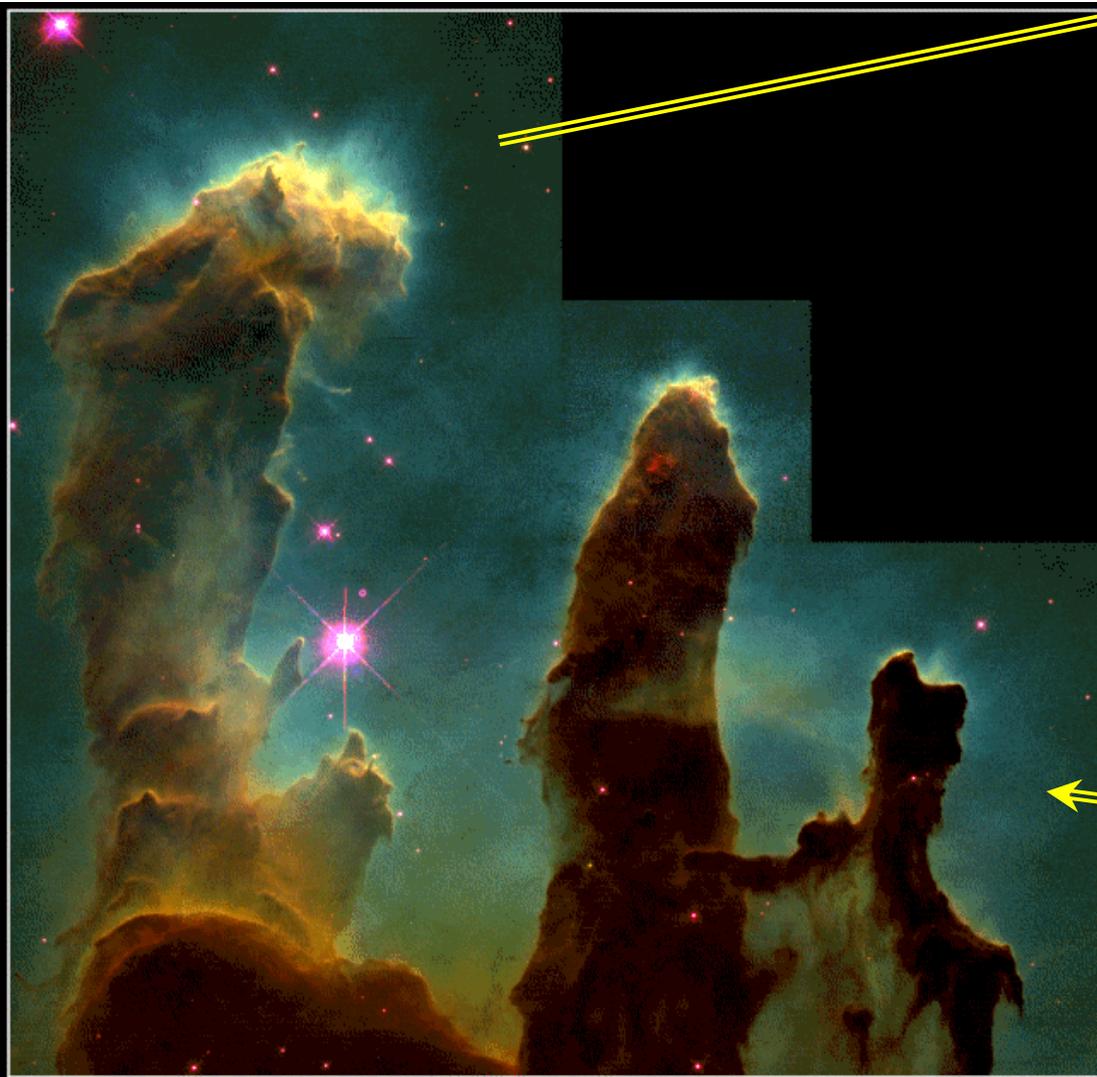


# Formation des étoiles

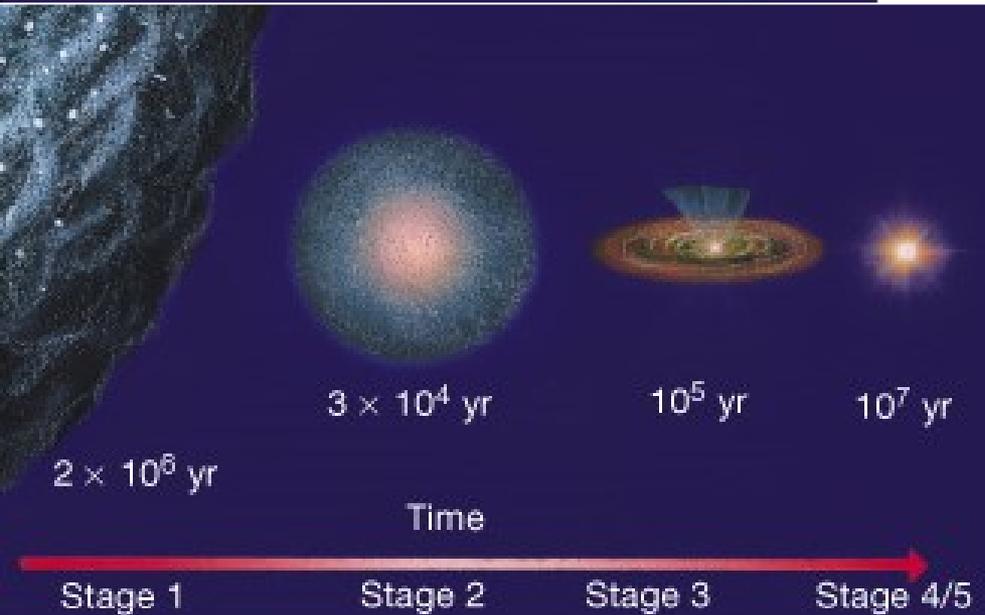
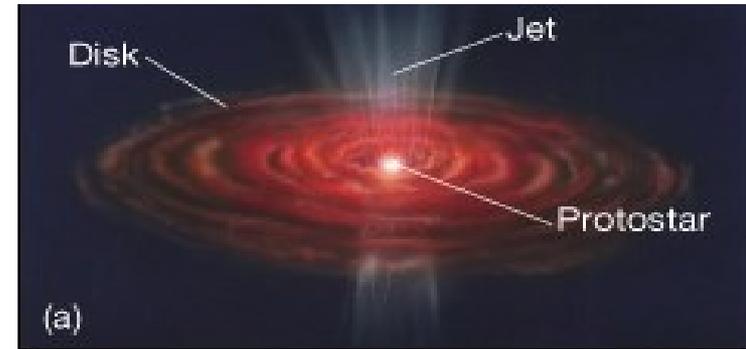
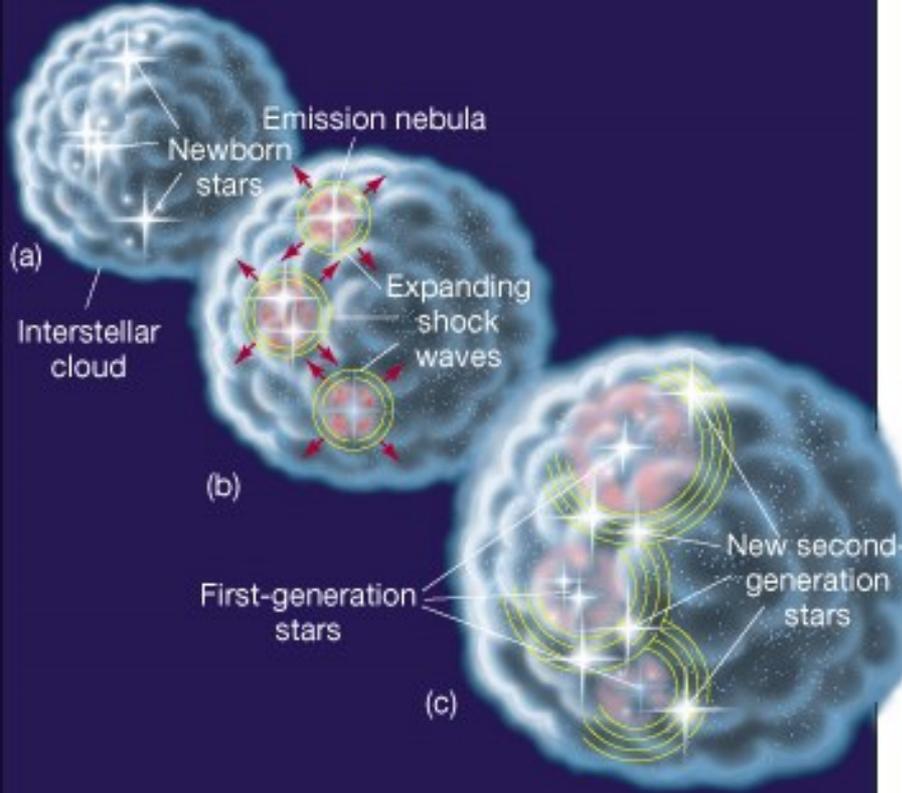
- Formation continue des étoiles dans notre Galaxie: étoiles vieilles, jeunes,...
- Les étoiles se forment à l'int. des **nuages moléculaires géants**:  $M \approx 10^5 M_{\odot}$ ;  $\approx 50$  pc (=150 a.l.) ; qq K: cœurs denses de taille typique 1 pc (3.26 al) et d' $1 M_{\odot}$
- Naissance en groupe



# Exemple : M16

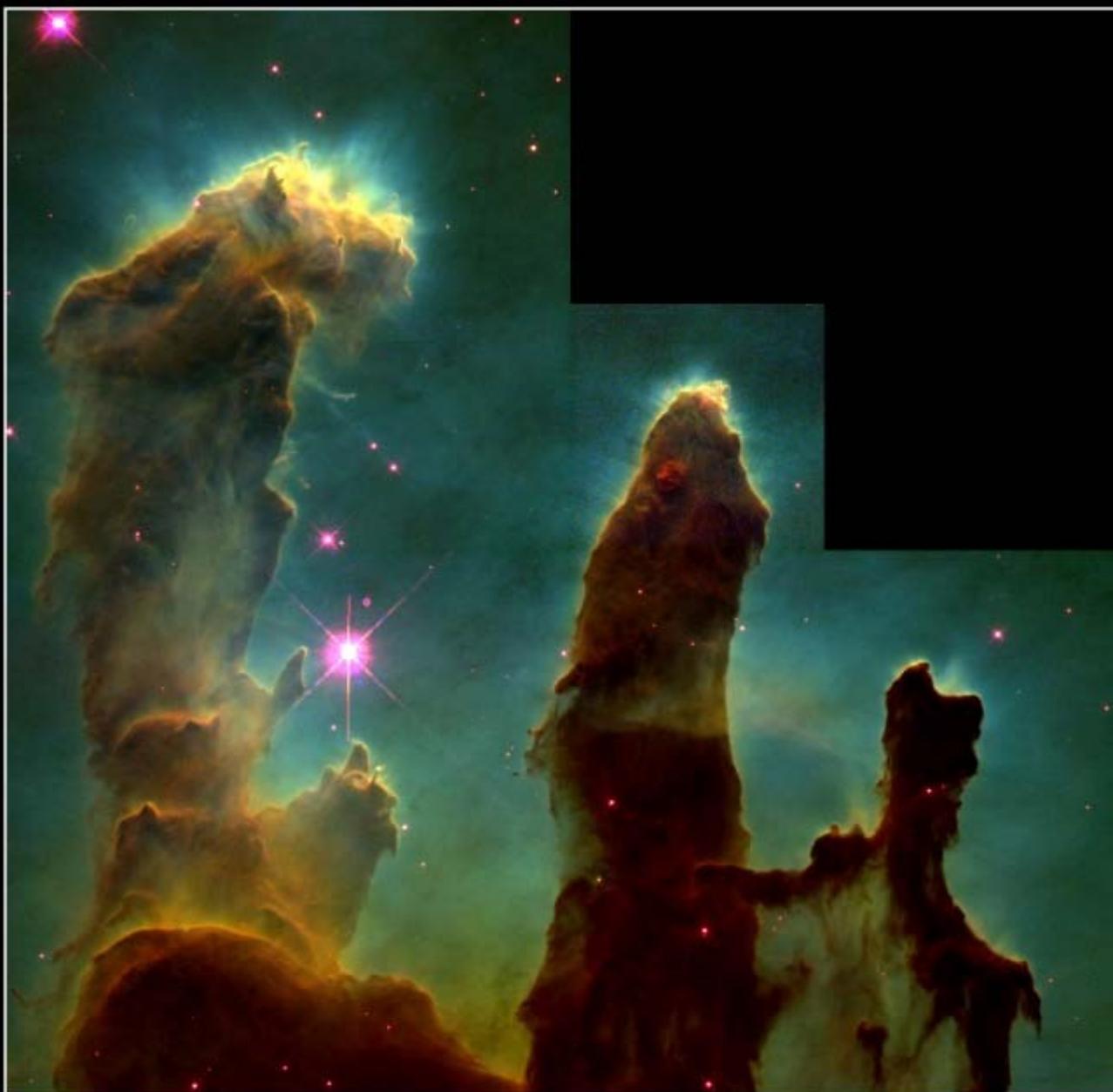


# Effondrement des cœurs denses



# Nouvelles étoiles dans Orion

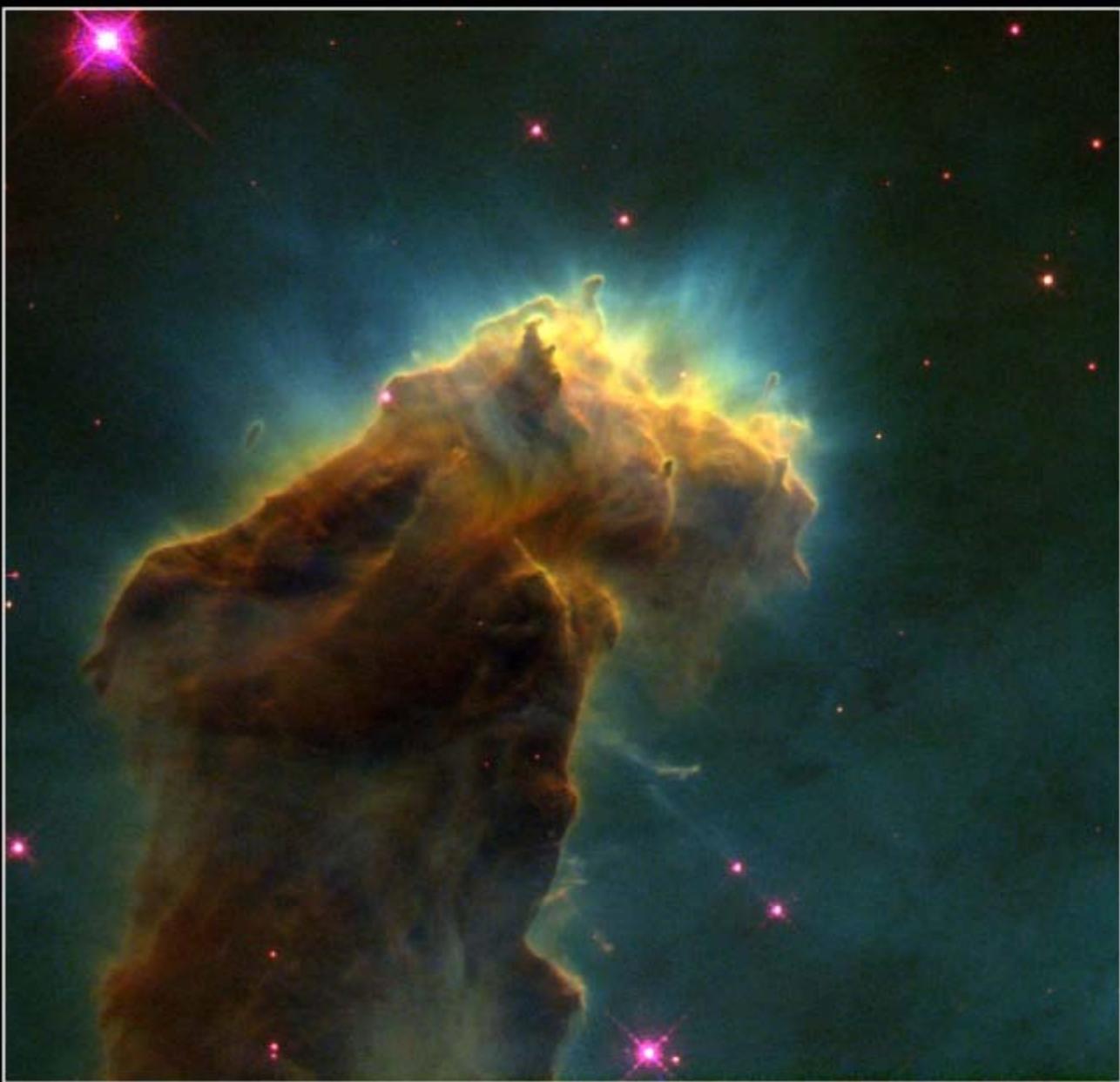




## Gaseous Pillars · M16

HST · WFPC2

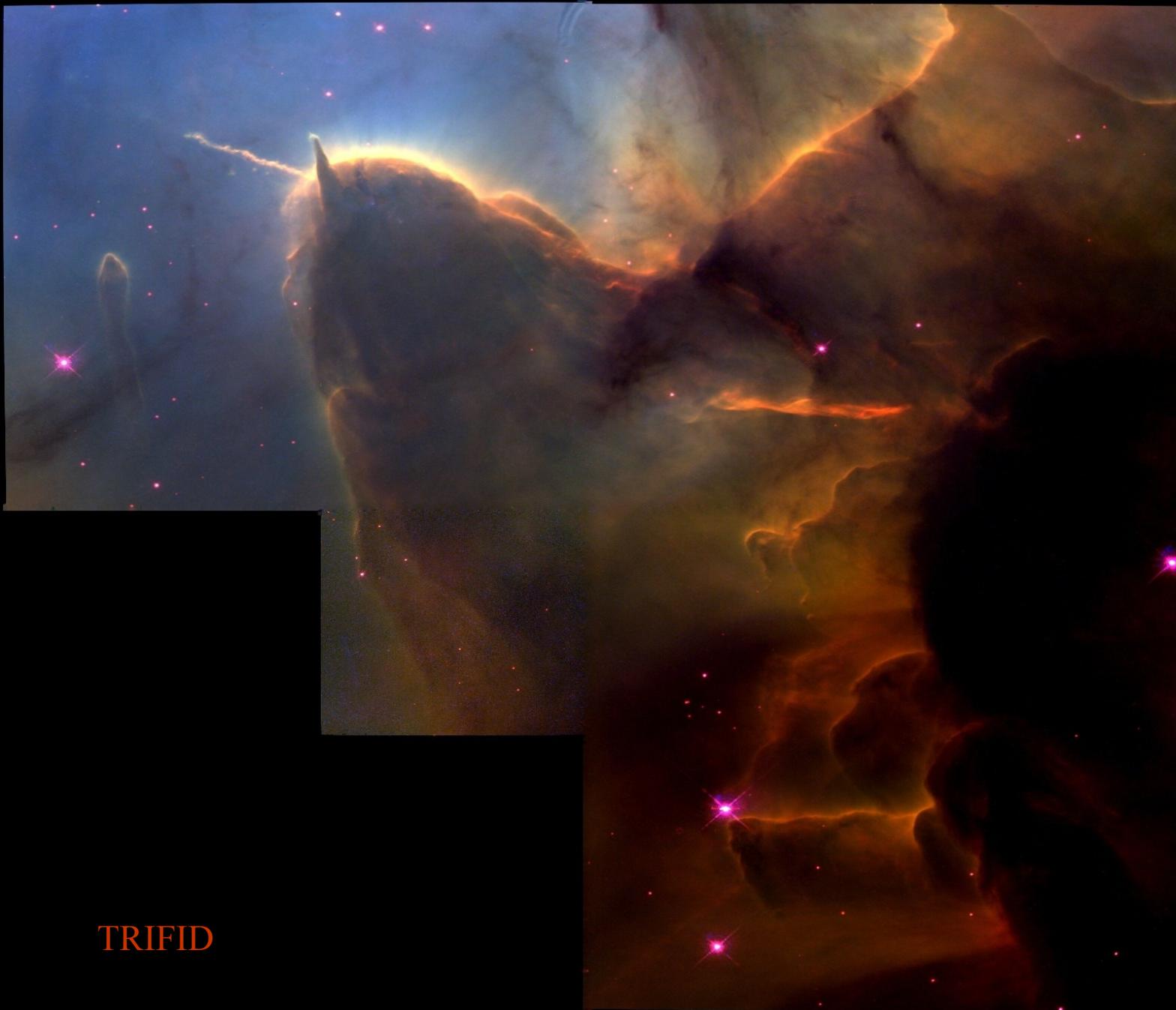
PRC95-44a · ST Scl OPO · November 2, 1995  
J. Hester and P. Scowen (AZ State Univ.), NASA



## Star-Birth Clouds • M16

HST • WFPC2

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

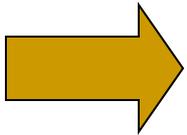


TRIFID

---

# **Le Modèle Actuel**

- 1. Un groupe d'étoiles se forment au sein d'un nuage de gaz en effondrement**
- 2. Les étoiles s'entourent d'un cocon de gaz (et de poussières ?)**
- 3. Les étoiles subissent des rencontres proches et parfois se dispersent**



Simulation numérique de la formation d'étoiles

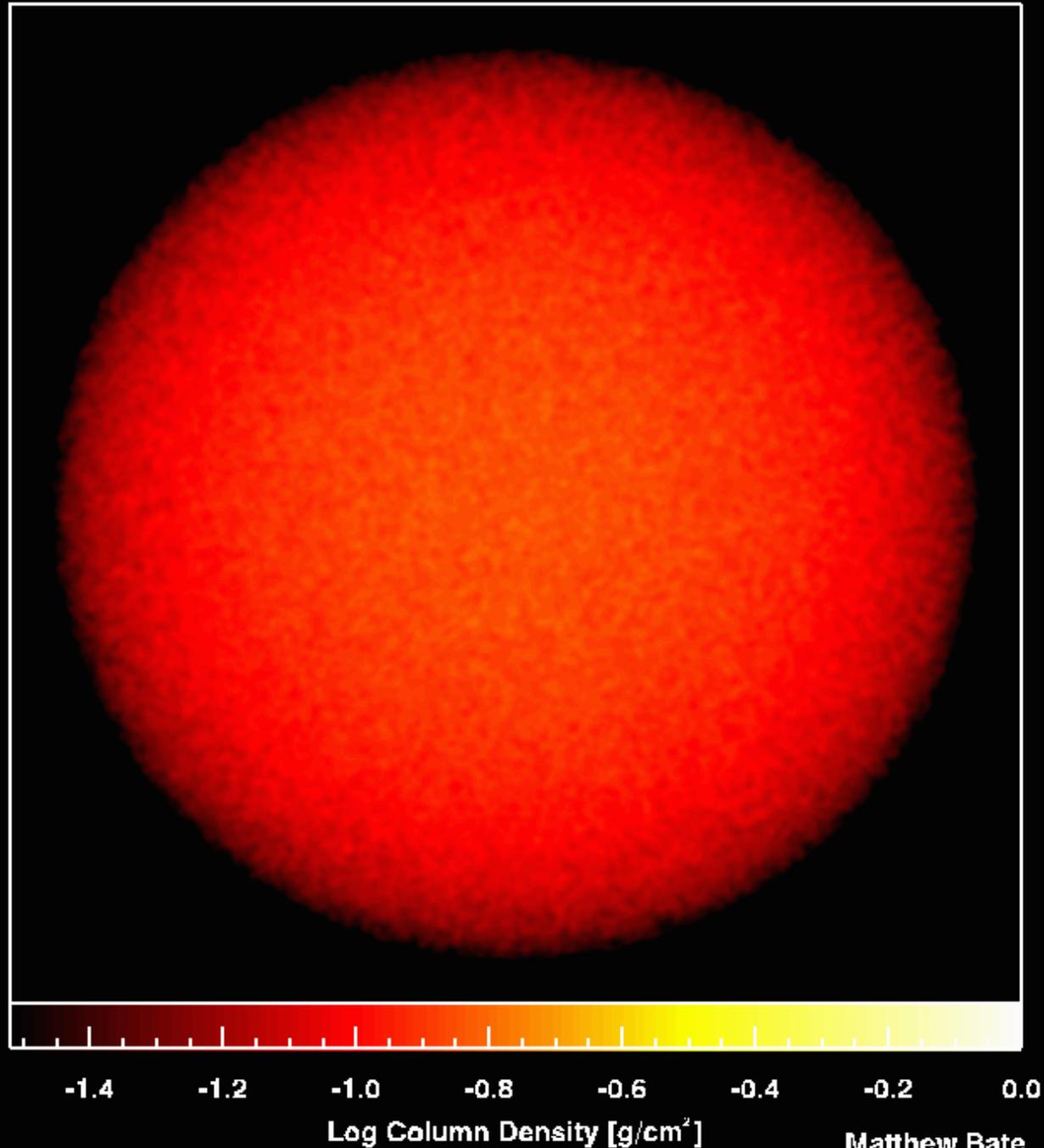
---

Dimensions: 82500. AU

Time: 0. yr

Simulation  
hydrodynamique 3D  
de formation d'étoiles  
en amas.

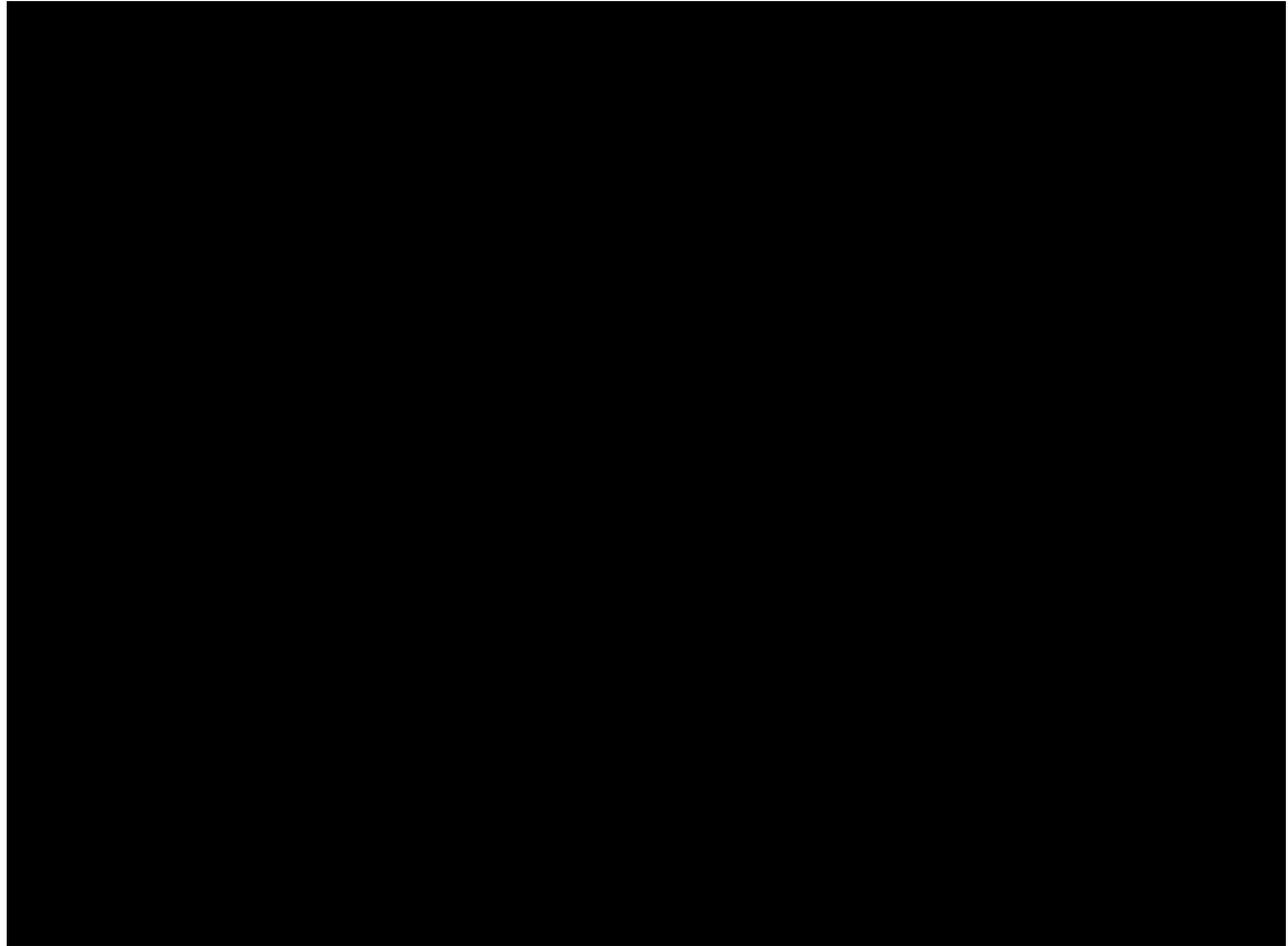
Point de départ: une  
sphère de gaz de  $500 M_{\odot}$

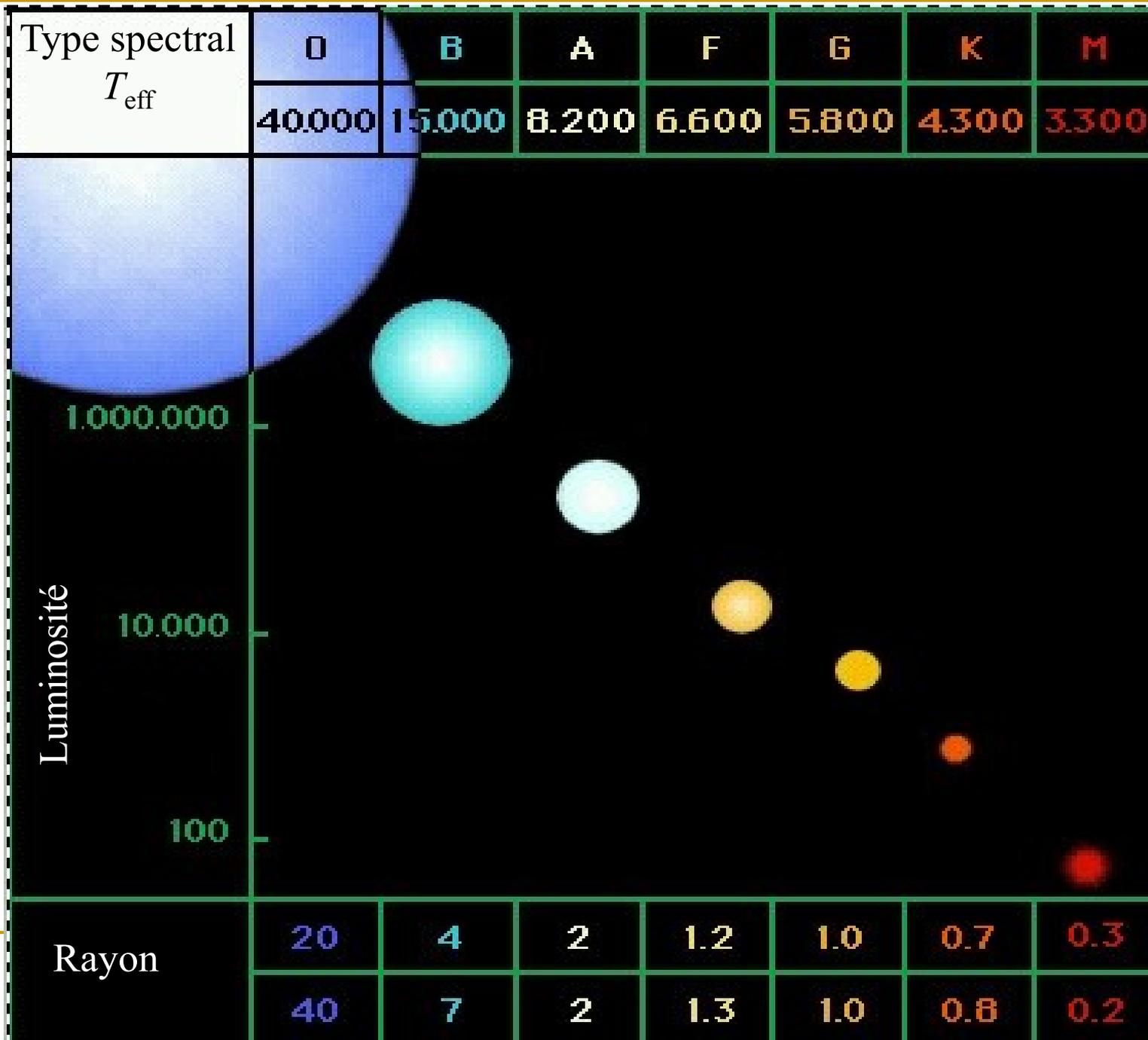


---

Simulation  
hydrodynamique 3D  
de formation d'étoiles  
en amas.

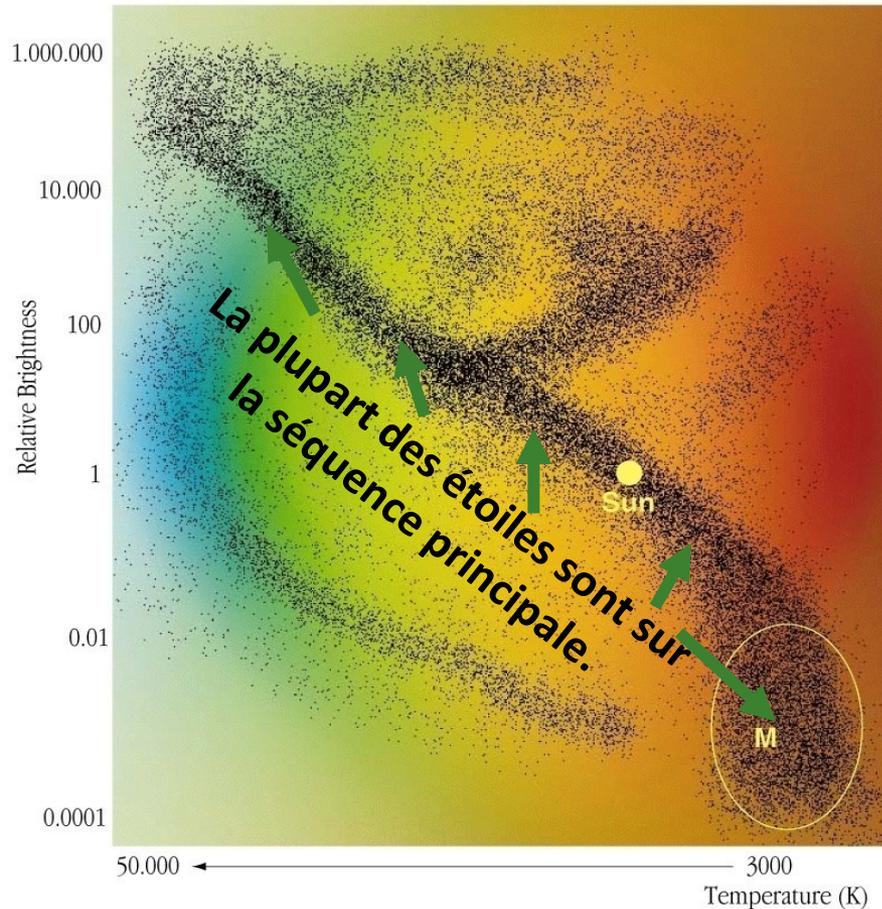
Point de départ: une  
sphère de gaz de  $500 M_{\odot}$   
Naissance de plus de  
1250 étoiles





# Diagramme Hertzsprung-Russell ( $\approx 1910$ )

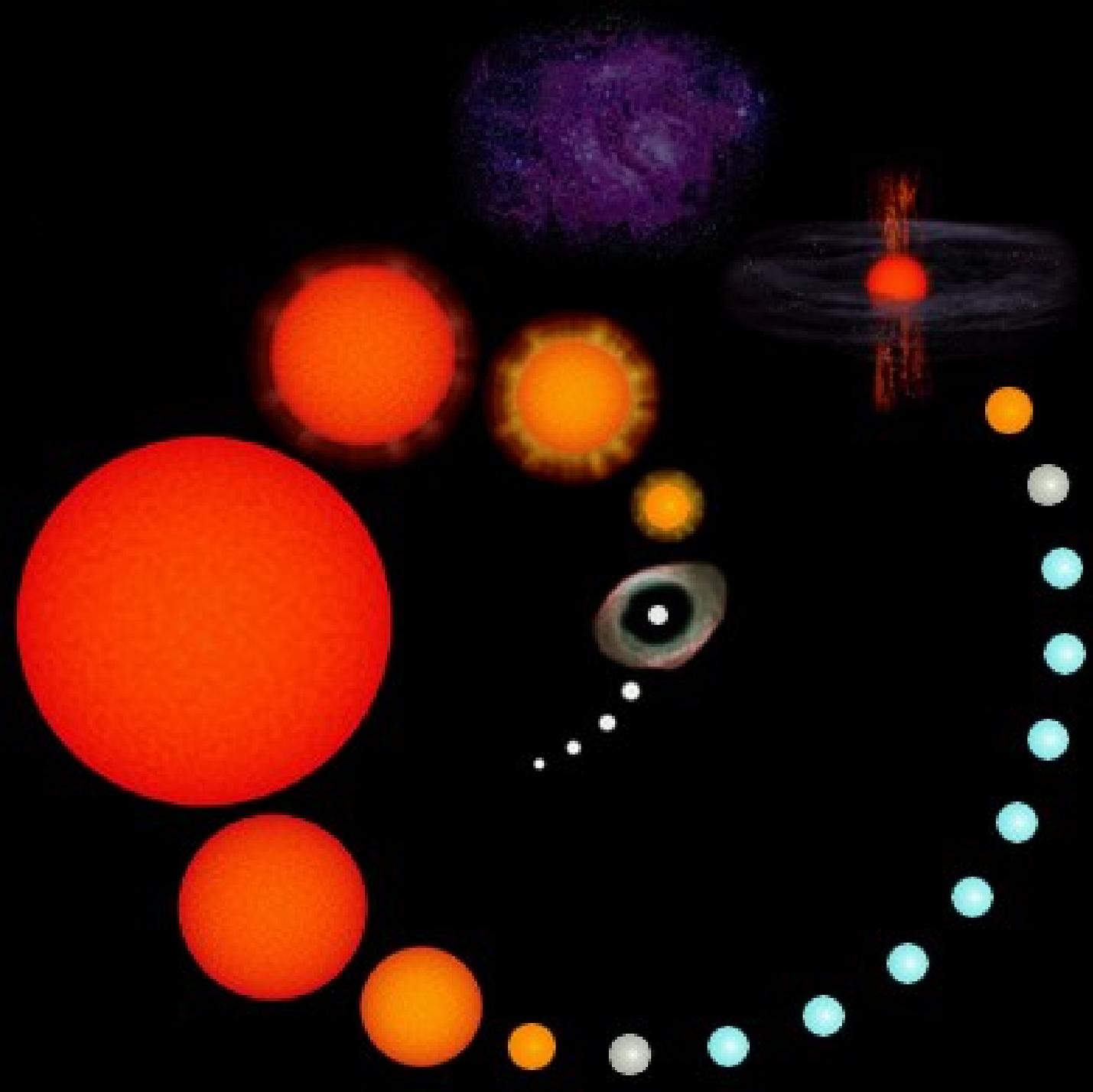
Grphe permettant « d'organiser » les étoiles:  $\Leftrightarrow$  Luminosité en fonction de la température. Chaque étoile à une position sur ce graphe. N.B.: axes logarithmiques &  $T_{\text{surface}}$  augmente avec R et L



La séquence principale est prépondérante car c'est là où les étoiles passent l'essentiel de leur vie.

Le Soleil est une étoile SP. Actuellement âgé de 4.7 Md d'années (vie de 10 Md).

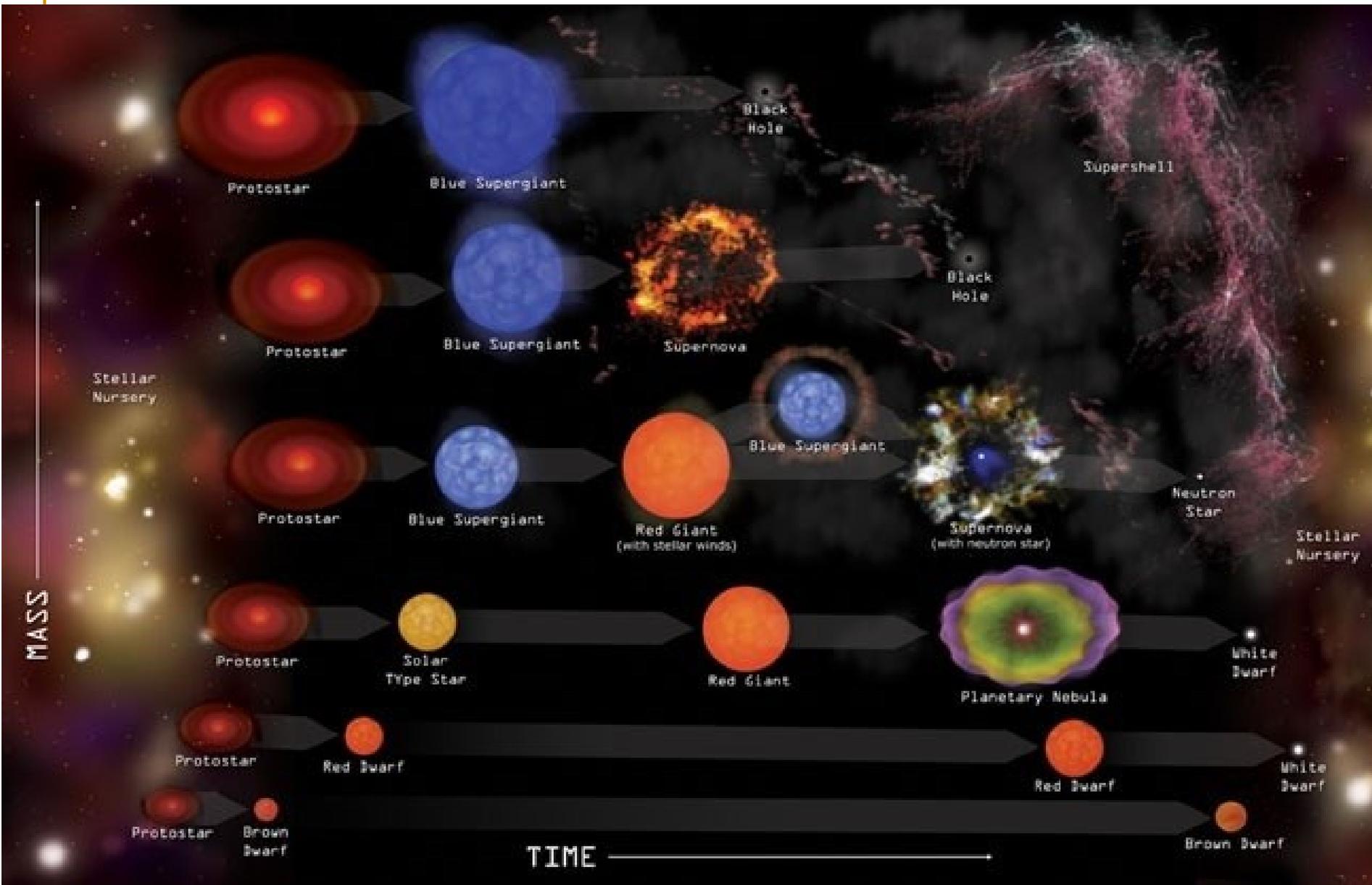
Les autres régions sont associées avec la naissance et la mort des étoiles.



---

**Évolution d'une  
étoile de type  
solaire**

---



MASS

TIME

Stellar Nursery

Stellar Nursery

Protostar

Blue Supergiant

Black Hole

Supershell

Protostar

Blue Supergiant

Supernova

Black Hole

Protostar

Blue Supergiant

Red Giant  
(with stellar winds)

Blue Supergiant

Supernova  
(with neutron star)

Neutron Star

Stellar Nursery

Protostar

Solar Type Star

Red Giant

Planetary Nebula

White Dwarf

Protostar

Red Dwarf

Red Dwarf

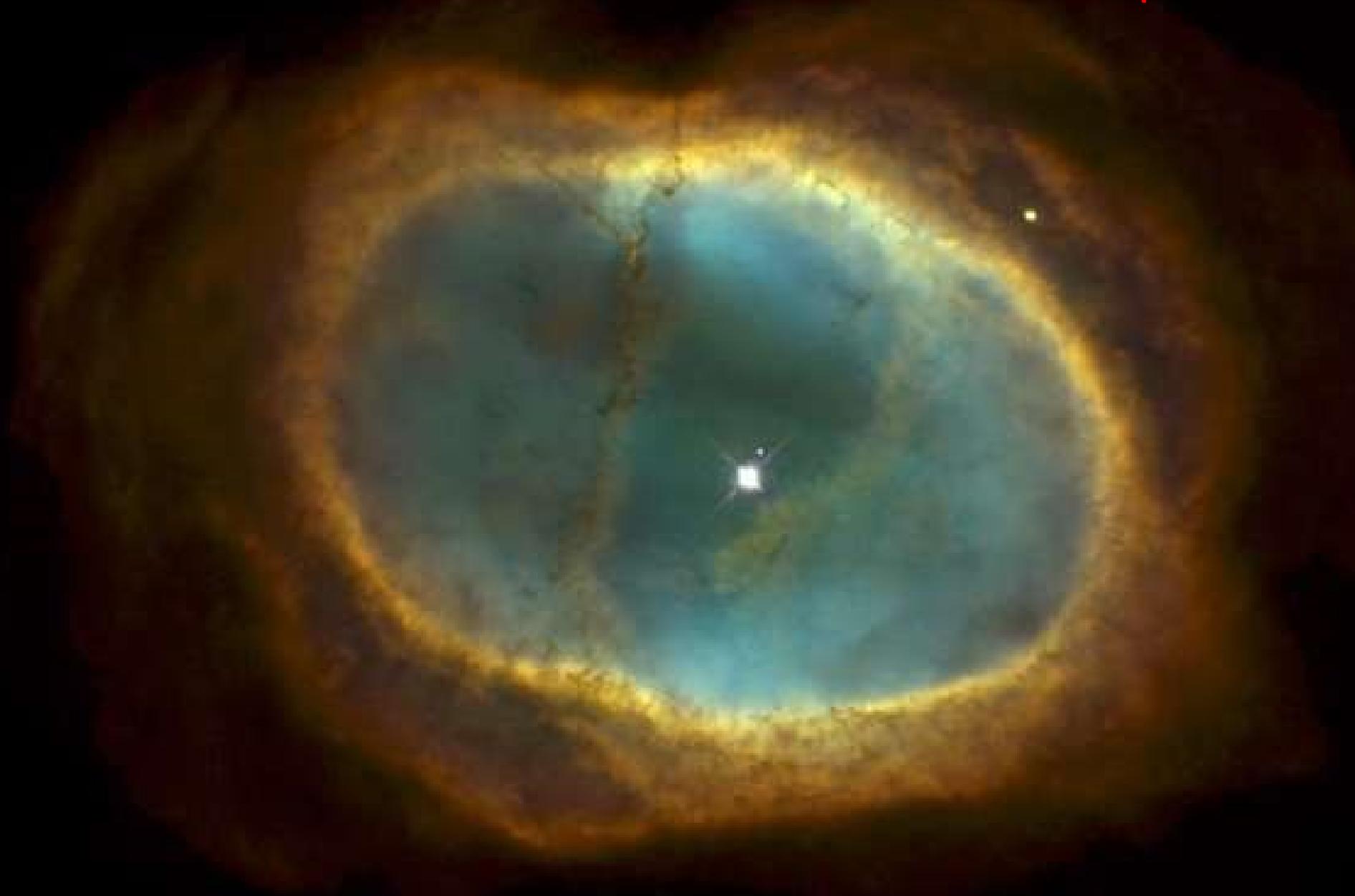
White Dwarf

Protostar

Brown Dwarf

Brown Dwarf

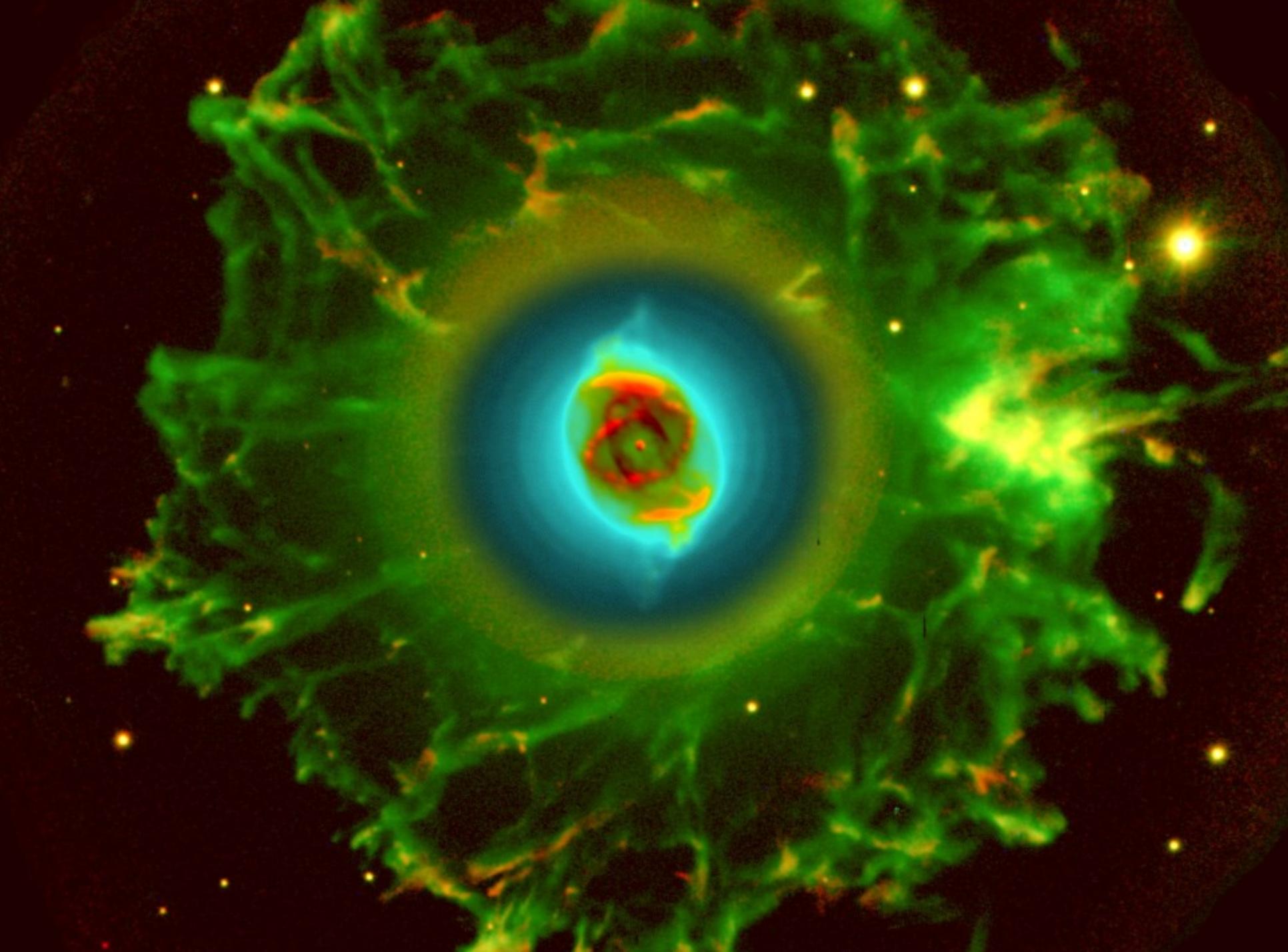
Mort lente d'une étoile de faible masse: nébuleuse planétaire

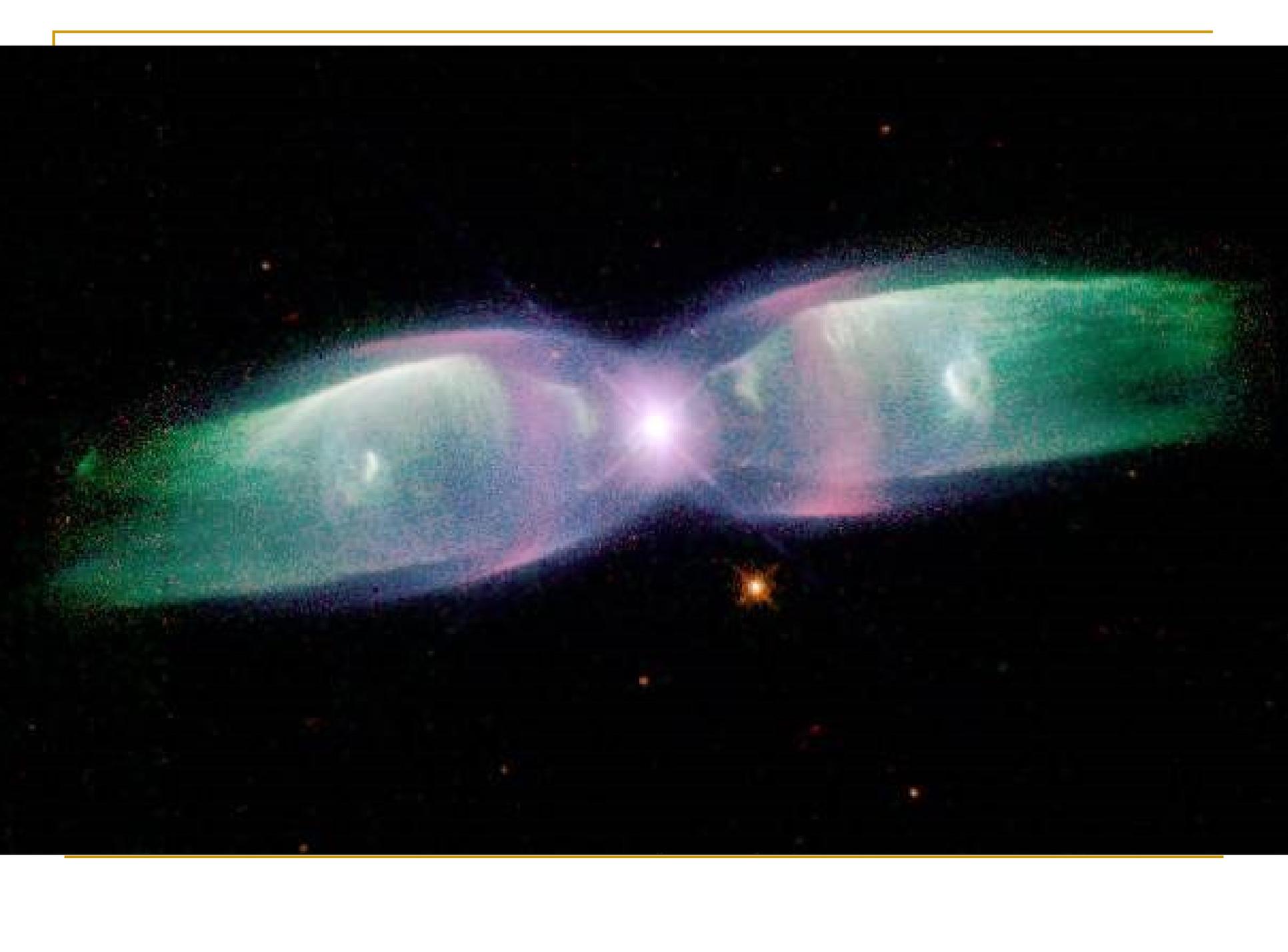








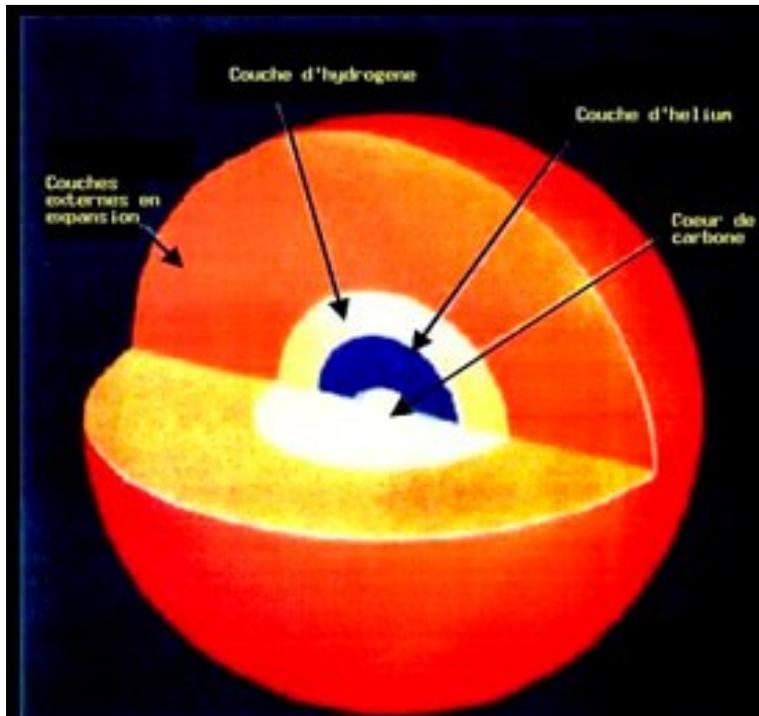




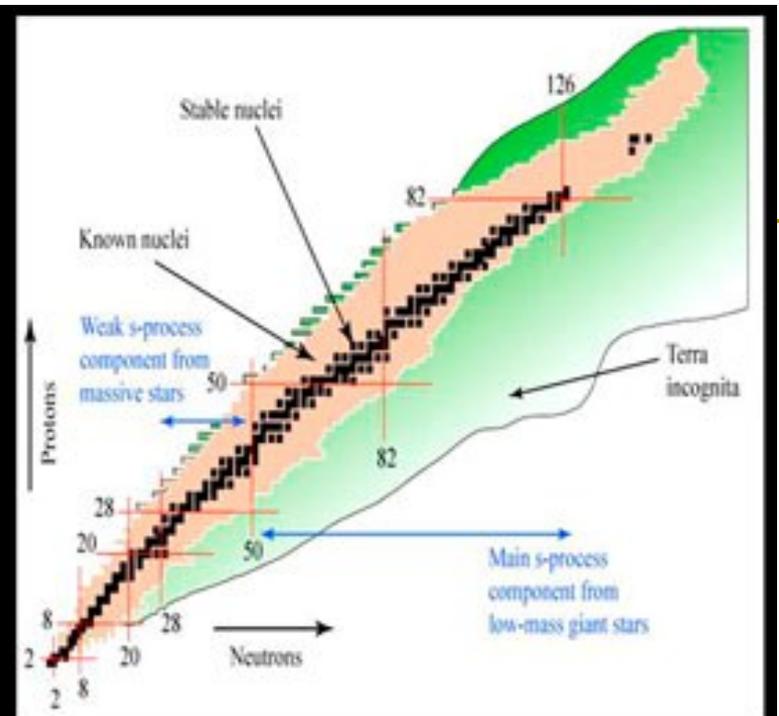
Mort explosive d'une étoile de forte masse: supernova



# IIIb: Nucléosynthèse stellaire



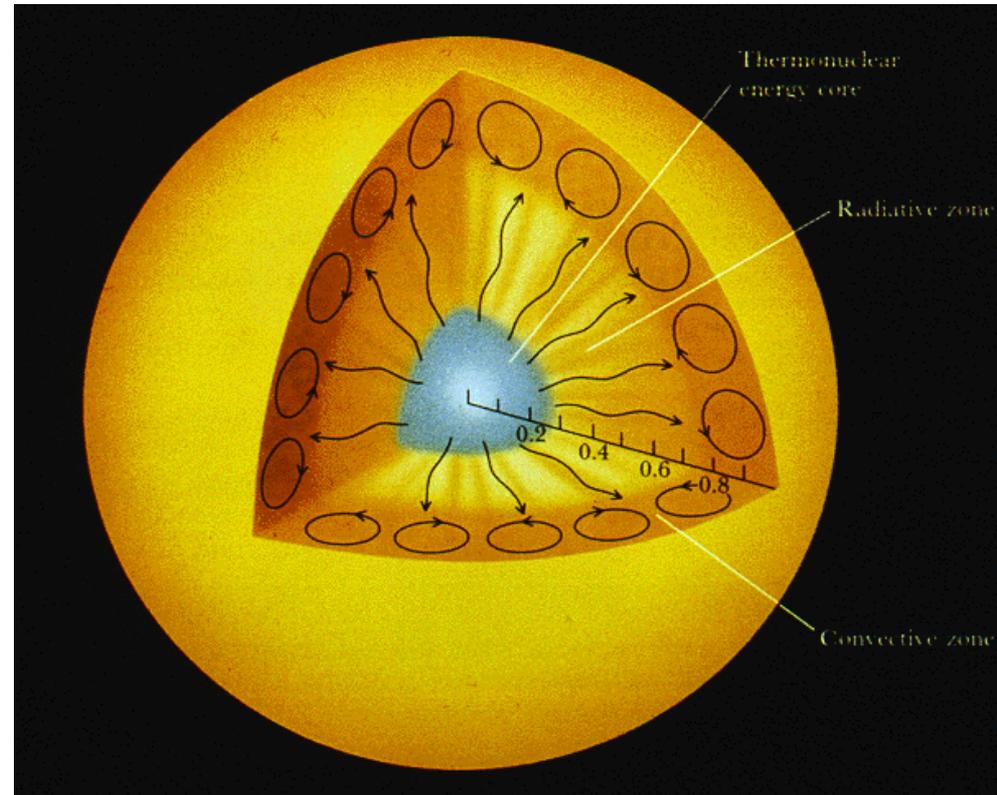
- Structure interne d'une étoile AGB -





# Nucléosynthèse stellaire

- Big-Bang synthétise les éléments jusqu'au B
- Éléments plus lourds formés dans les étoiles ?
- Nécessite densité et T plus élevées, 3 cas :
  - Nucléosynthèse stellaire :
    - Étoile faible masse
    - Étoile forte masse
  - Nucléosynthèse explosive : SN



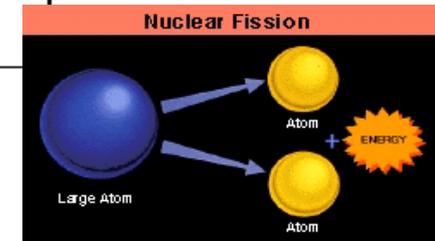
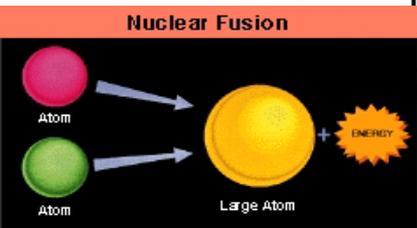
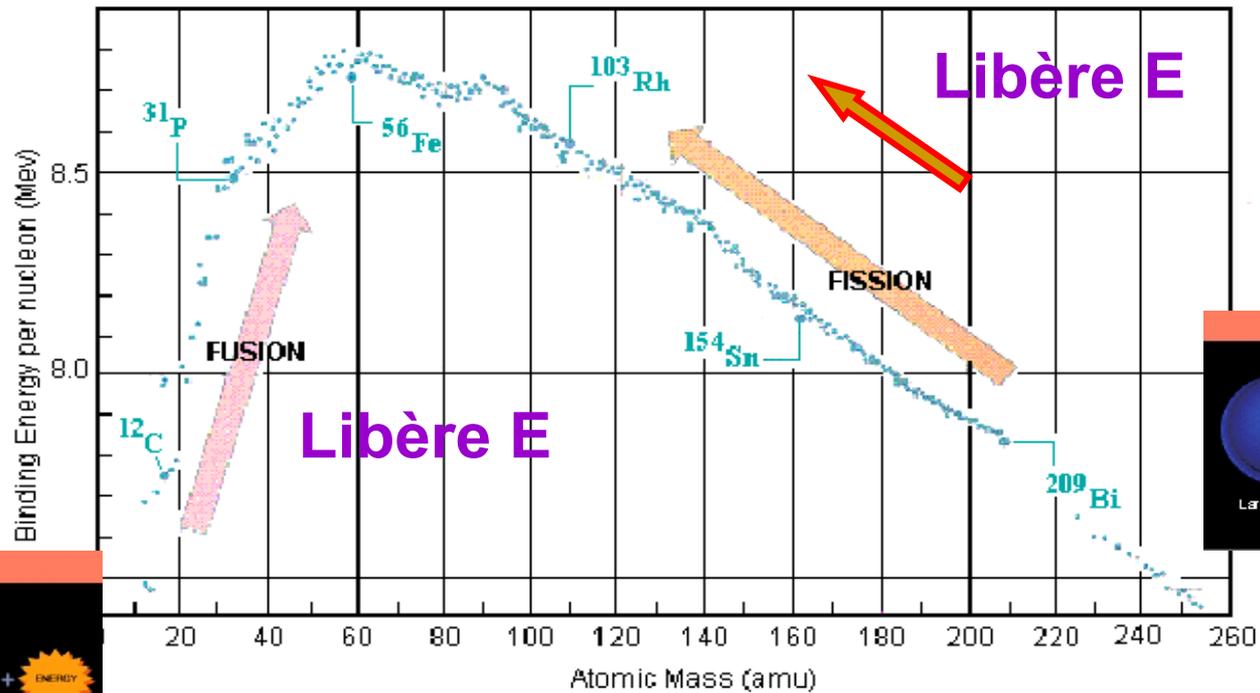
# Energie de liaison – le moteur des étoiles

- La masse d'un noyau est toujours inférieure à la somme des masses de ses constituants:
  - Défaut de masse =  $(Z.M_p + N.M_n) - M_{\text{noyau}}$
  - Rappel : noyau = A nucléons dont Z protons et N=A-Z neutrons
- Formation du noyau à partir de ses constituants (neutrons et protons) : qu'est devenu cette masse manquante?
  - ⇒ Libérée sous forme d'**énergie** (rayon gamma):  $E = m.c^2$
- Energie de liaison du noyau =  $c^2 [ (Z.M_p + N.M_n) - M_{\text{noyau}} ]$

C'est aussi l'énergie qu'il faut fournir au noyau pour le briser en ses constituants (neutrons et protons).

---

# Énergie de liaison



Certains noyaux sont plus liés que d'autres :

- n. légers : liaison faible
- Fer (26) : liaison la + forte
- n. lourds : - liés

De l'énergie est libérée lors de:

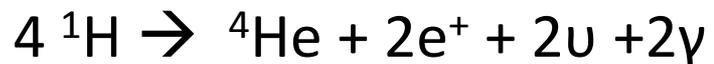
- Fusion des noyaux légers
- Fission des noyaux lourds

# Fusion Hydrogène : chaîne p-p

Réactions inconnues jusqu'en  $\approx 1930s$   
Implique séries de collisions de 2-particules: chaîne p-p

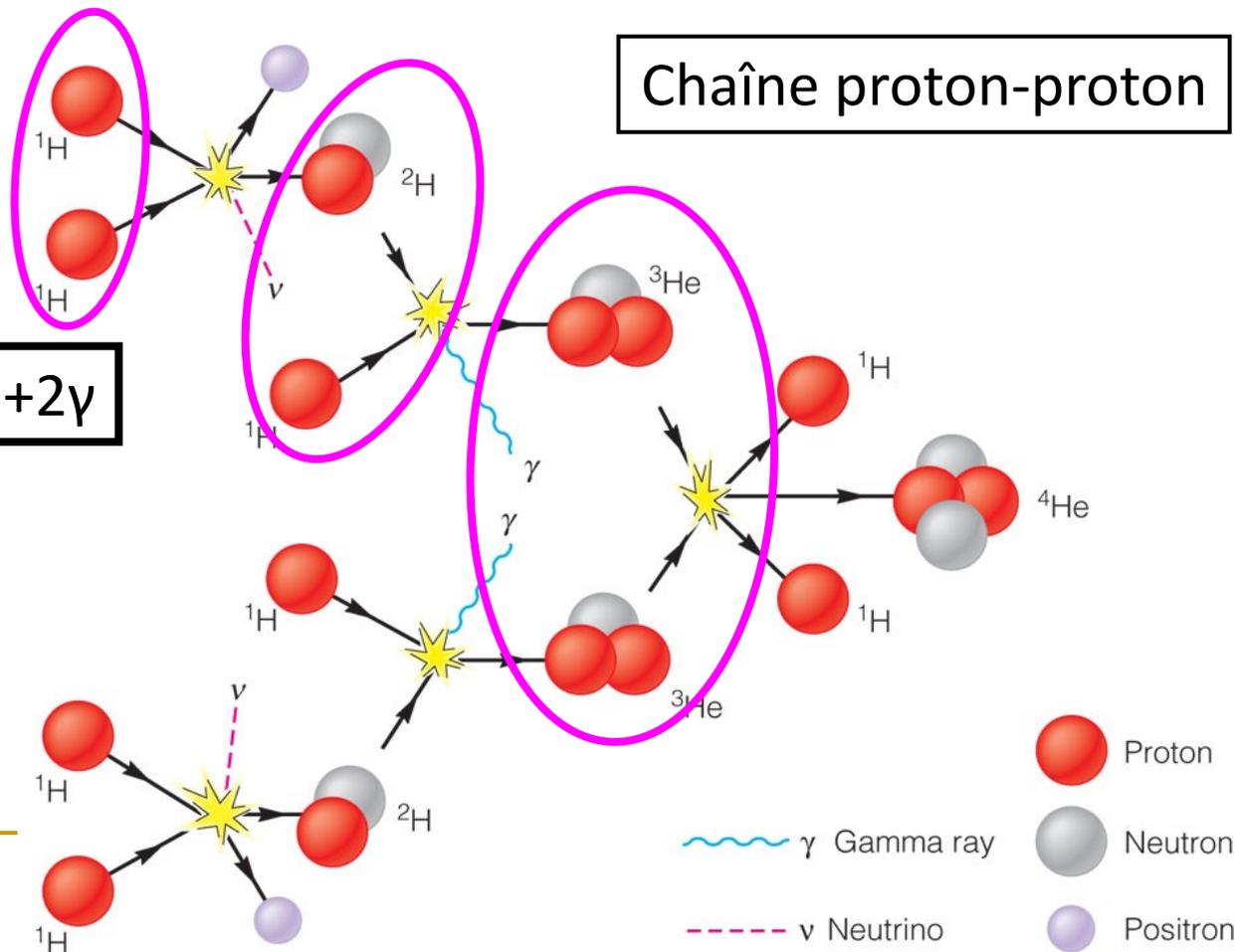
3 étapes, répétés 2 x

Réaction nette:



Énergie :  $E_c$  &  $\gamma$  &  $\nu$   
 $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$

$E_c$  &  $\gamma$  chauffent coeur  
 $\nu$  échappe coeur & Soleil



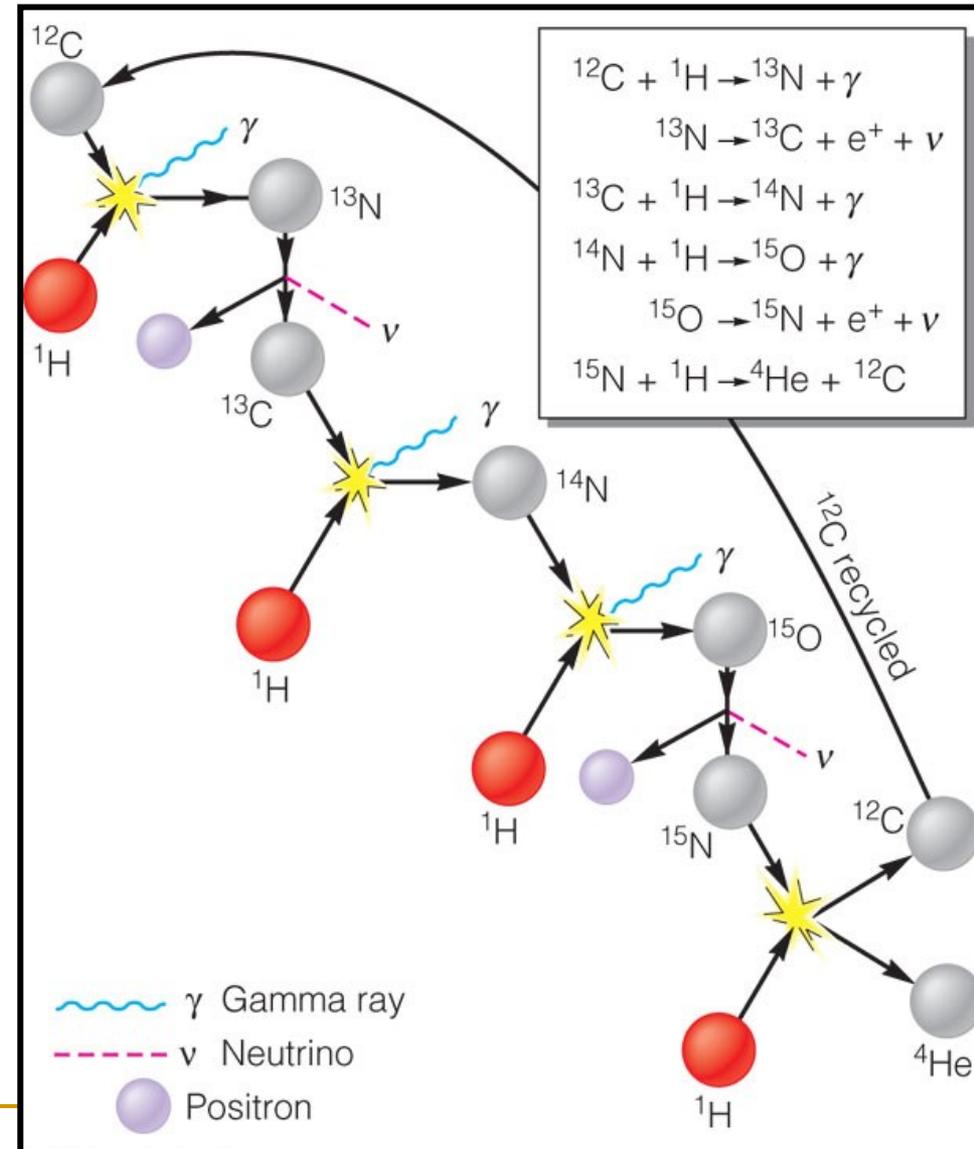
# Etoiles de forte masse

- A plus forte temp ( $15 \cdot 10^6$  K), cycle CNO + efficace que p-p.

- C,N,O: barrière Coulomb + gd  $\Rightarrow$  besoin temp + gde

- Essentiellement pour les étoiles de + gde masse ( $1.5 M_{\odot}$ )

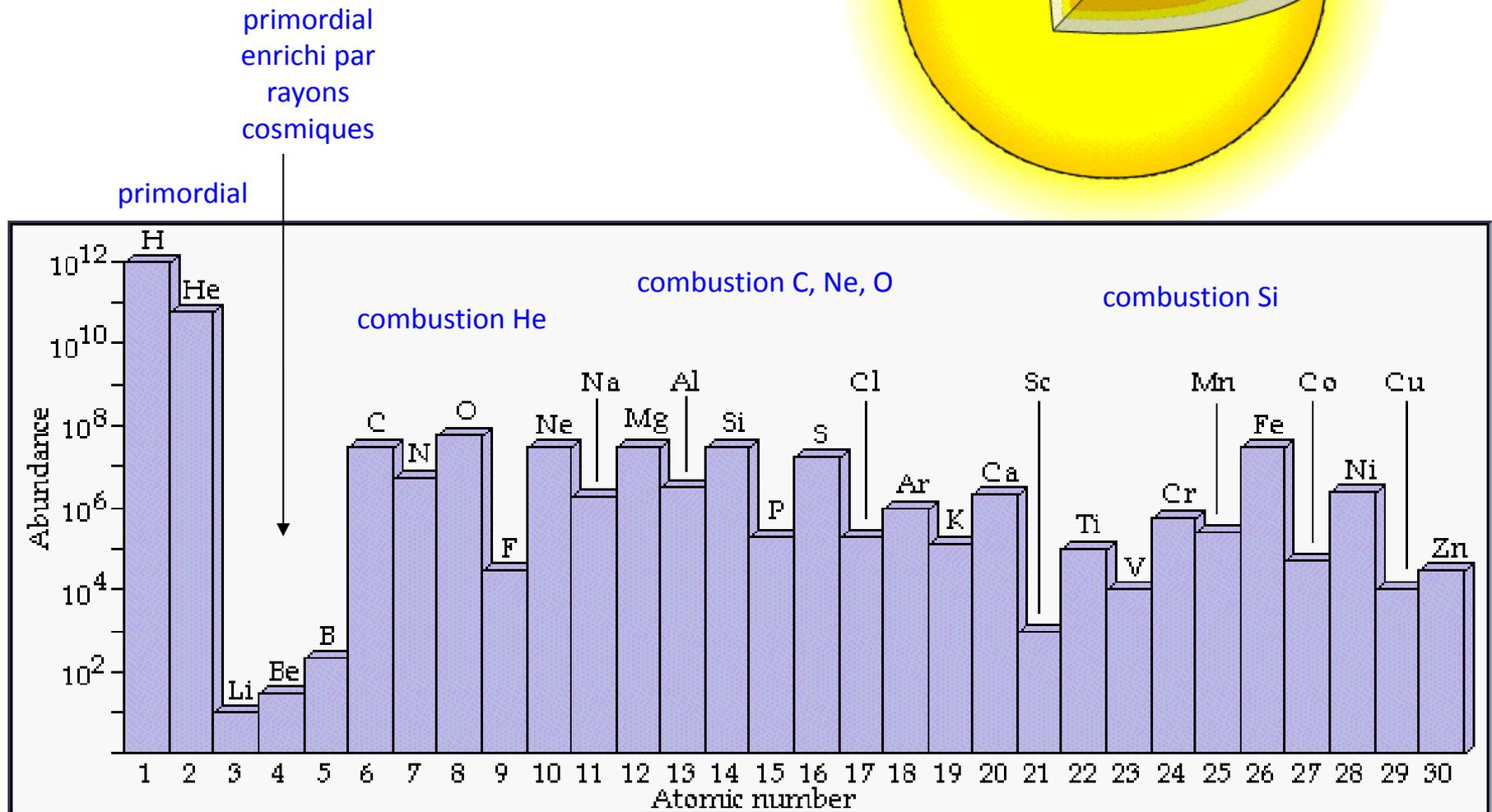
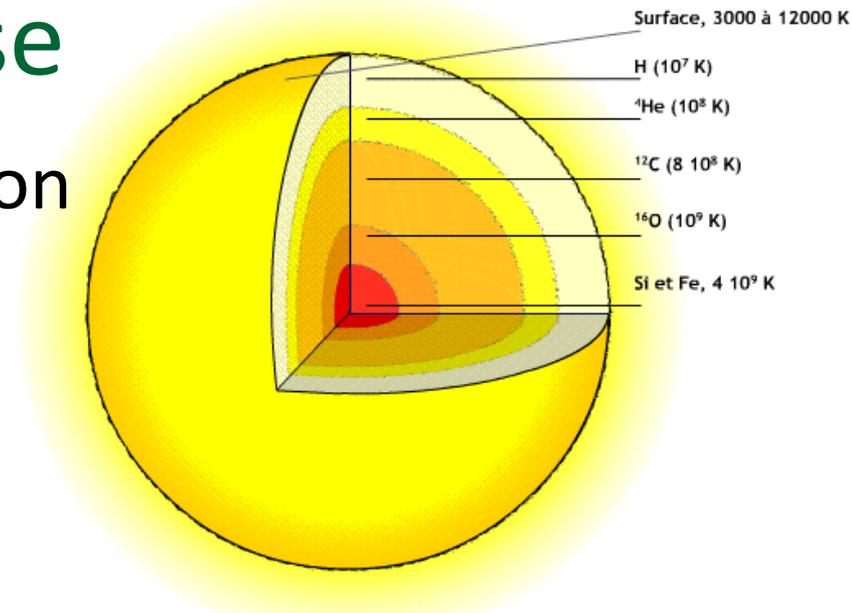
- $T_{\text{coeur}} > 10^9$  K alors le coeur O/Ne « s'allume »  $\Rightarrow$  Na, Mg, Al, Si  $\Rightarrow$  combustion en oignon

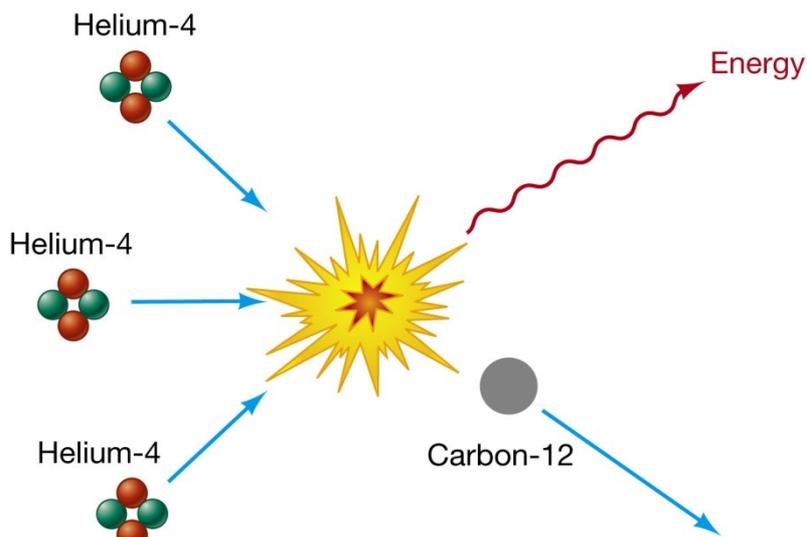


**Cycle CNO**

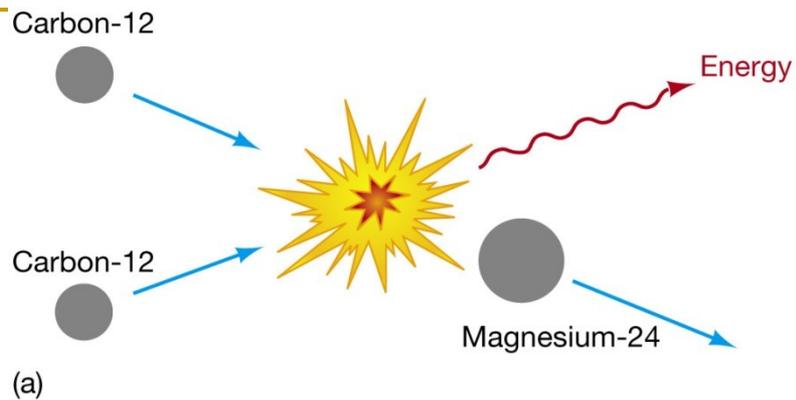
# Etoiles de forte masse

- combustion régulière en oignon
- + capture de neutrons libres

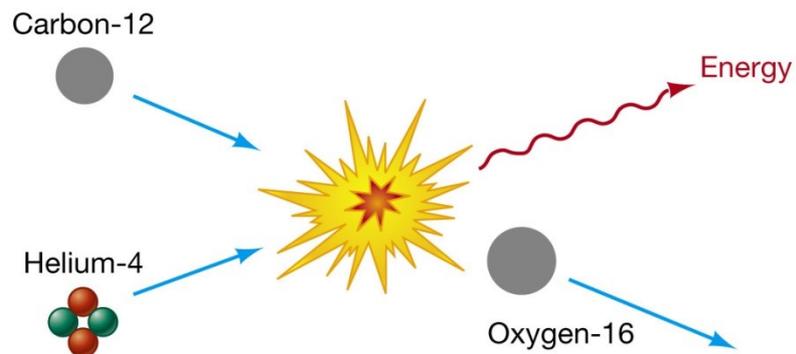




Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

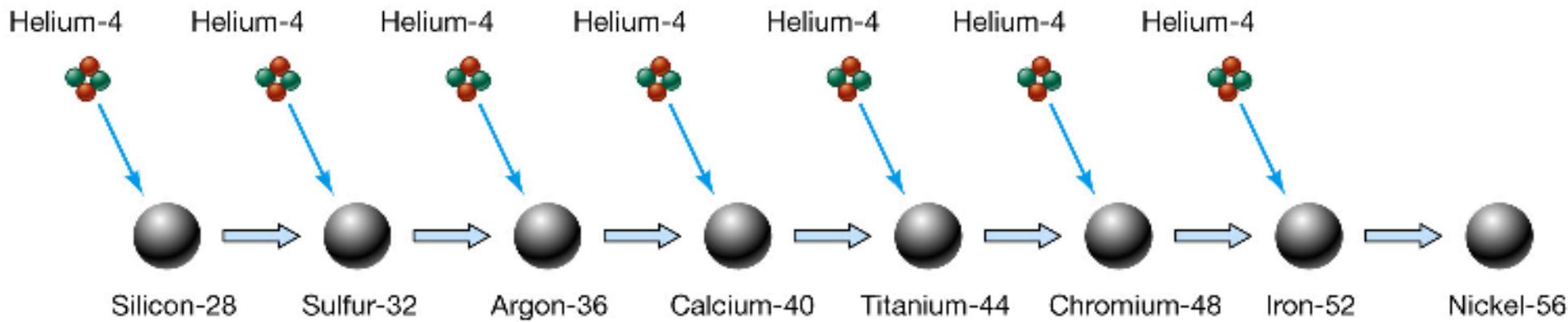


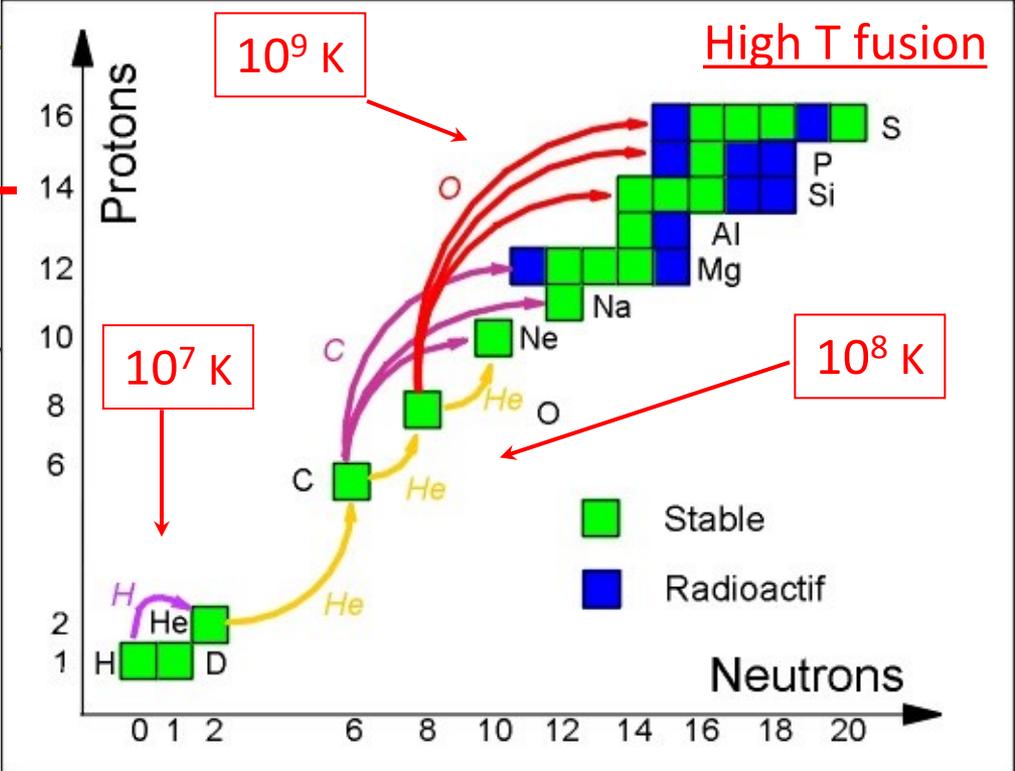
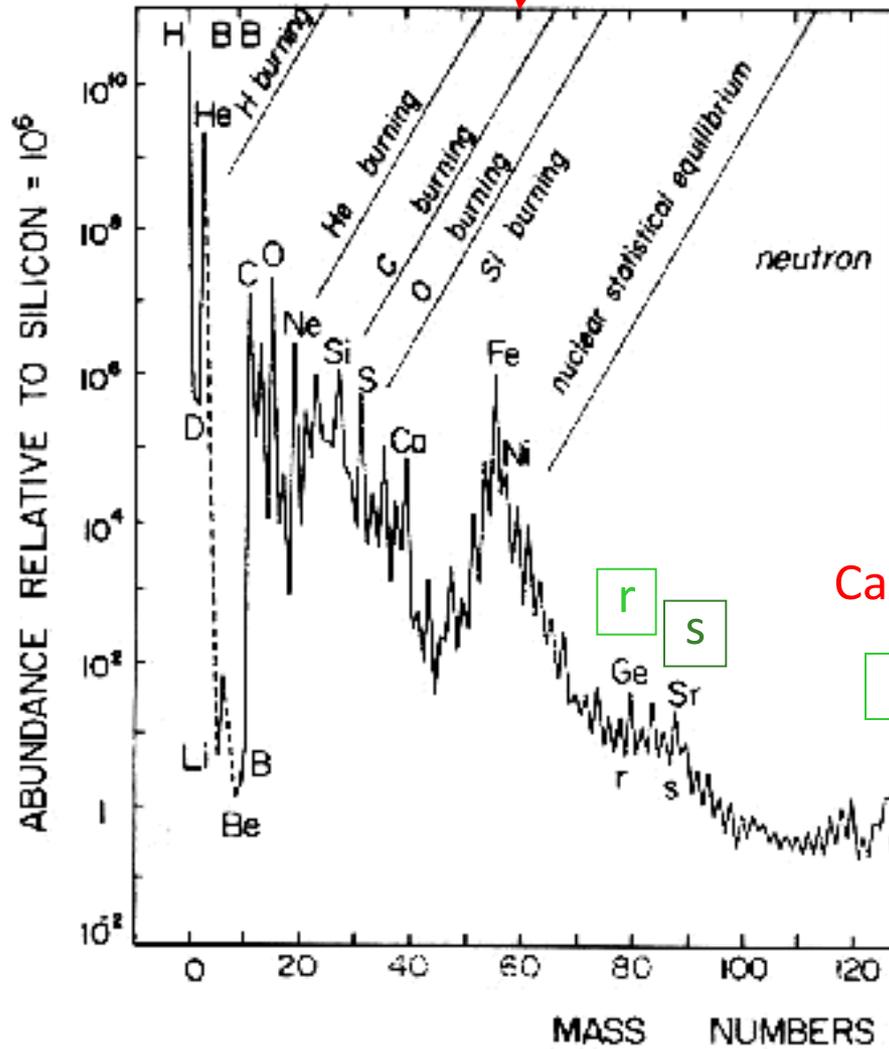
(a)



(b)

Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.





Capture rapide / lente neutrons



---

**Le dernier noyau dans la chaîne alpha est nickel-56, qui est instable et se désintègre rapidement en cobalt-56 et ensuite en fer-56.**

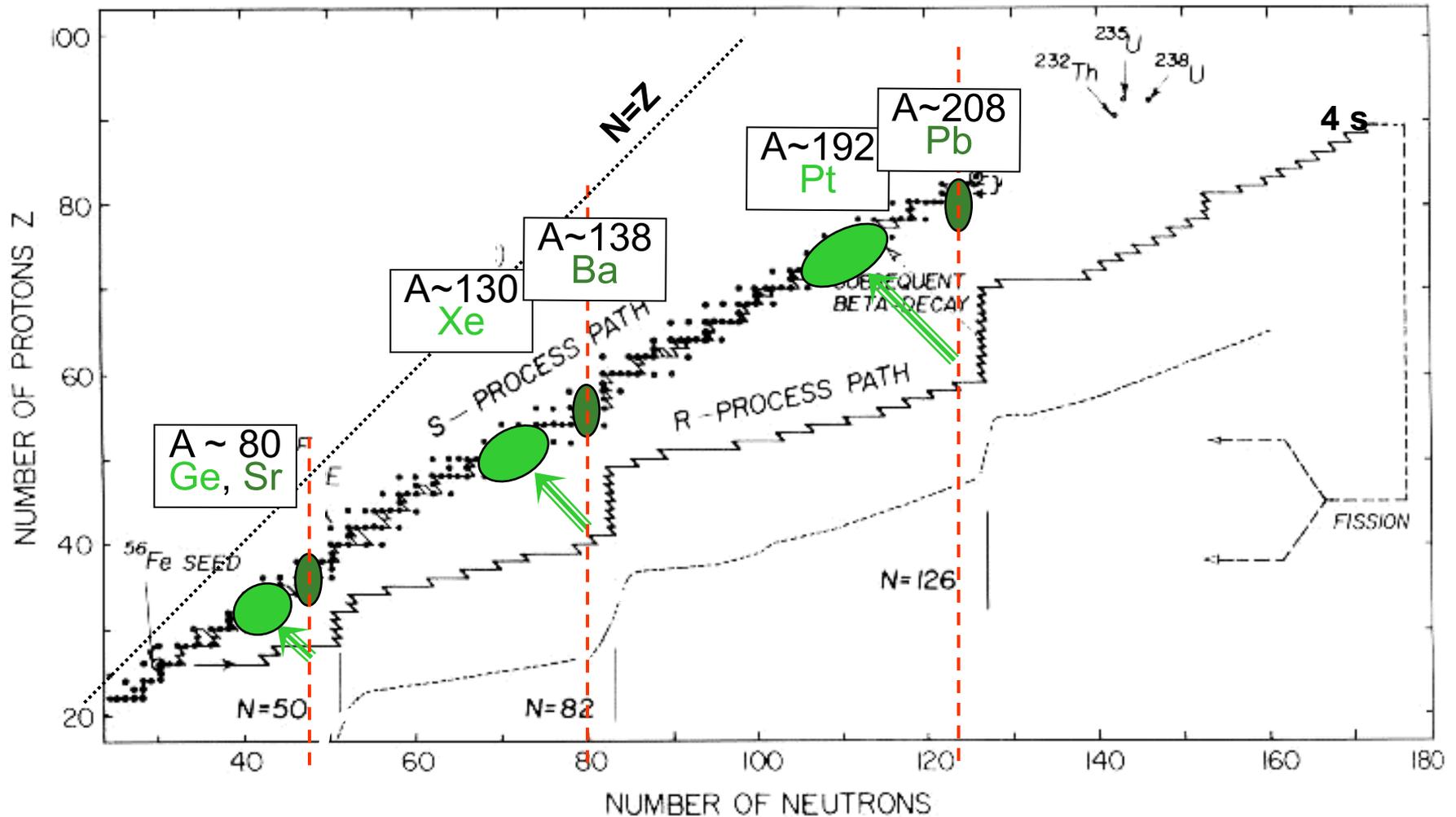
**Le fer-56 est le noyau le plus stable, il ne peut donc ni se désintégrer ni fusionner.**

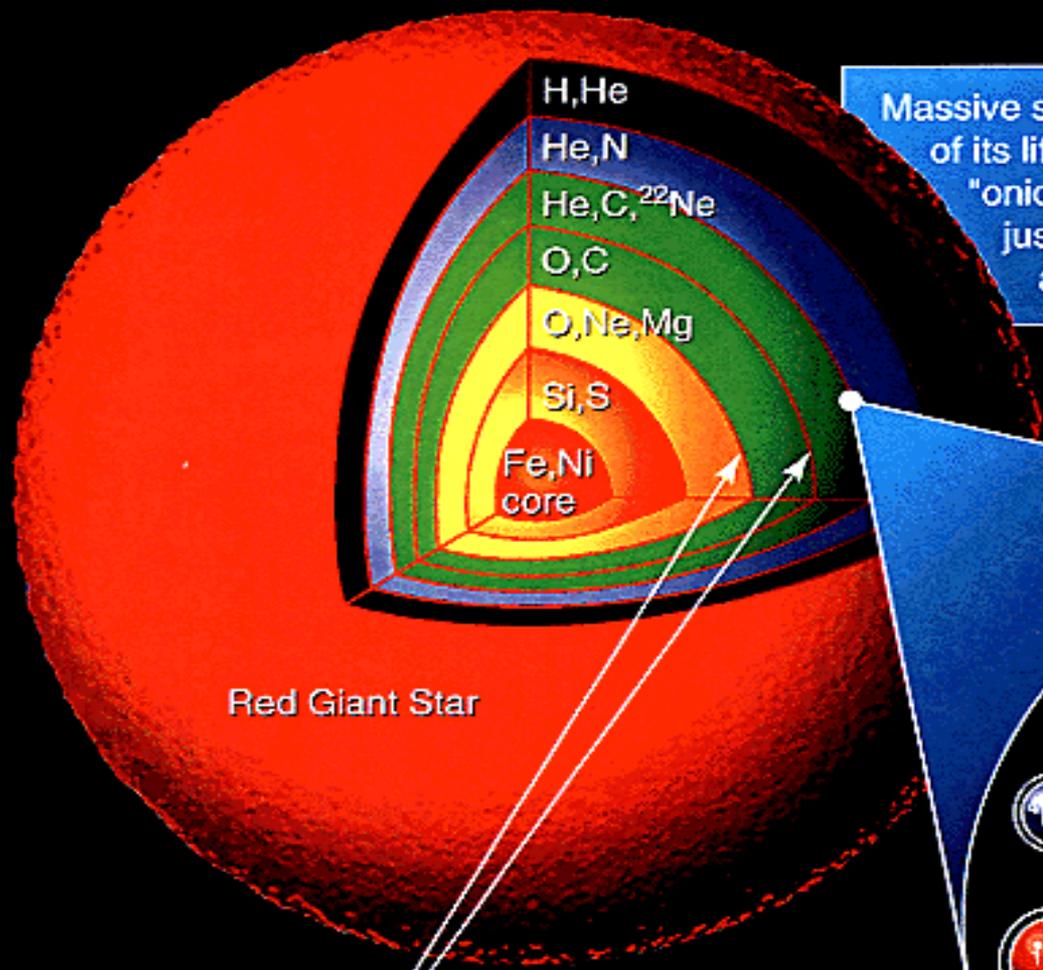
**Malgré tout, à l'intérieur du cœur des étoiles les plus massives, la capture (lente) de neutron peut créer des éléments lourds jusqu'au bismuth-209.**

**Les éléments les plus lourds sont formés par la capture (rapide) de neutron durant les premières secondes d'une supernova.**

---

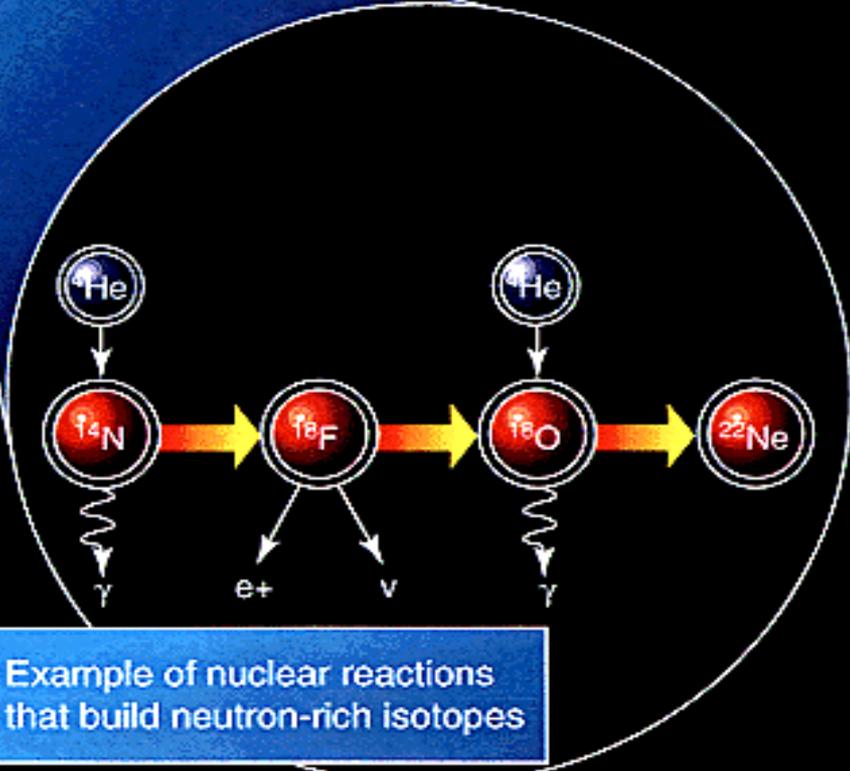
# Les éléments au delà du Fer



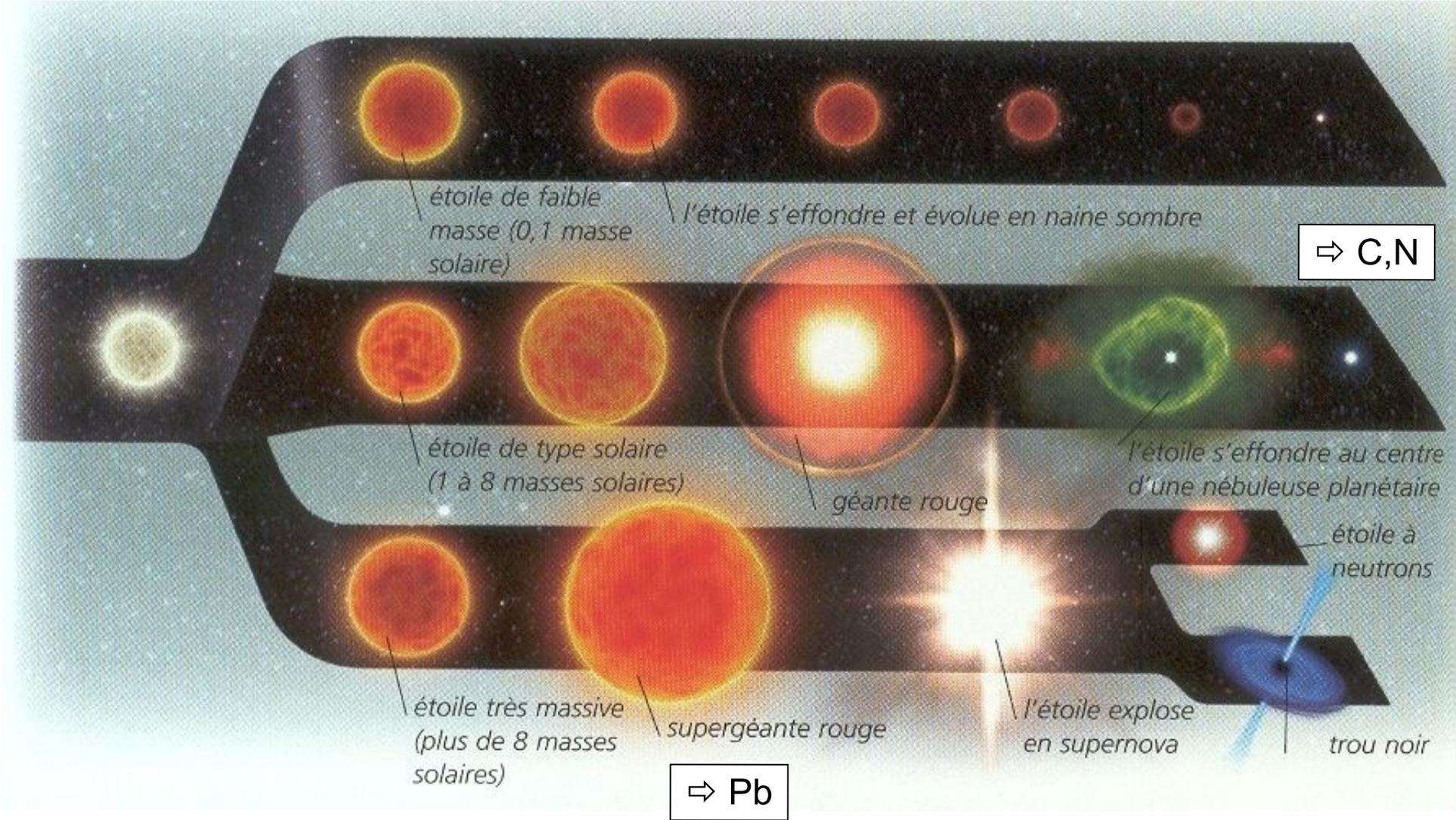


Massive star near the end of its lifetime has an "onion-like" structure just prior to exploding as a supernova

Nuclear burning occurs at the boundaries between zones



Example of nuclear reactions that build neutron-rich isotopes



étoile de faible  
masse (0,1 masse  
solaire)

l'étoile s'effondre et évolue en naine sombre

⇒ C,N

étoile de type solaire  
(1 à 8 masses solaires)

géante rouge

l'étoile s'effondre au centre  
d'une nébuleuse planétaire

étoile très massive  
(plus de 8 masses  
solaires)

supergéante rouge

l'étoile explose  
en supernova

étoile à  
neutrons

trou noir

⇒ Pb

Group→ ↓Period	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 H																	2 He
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba		72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra		104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo

Lanthanides

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

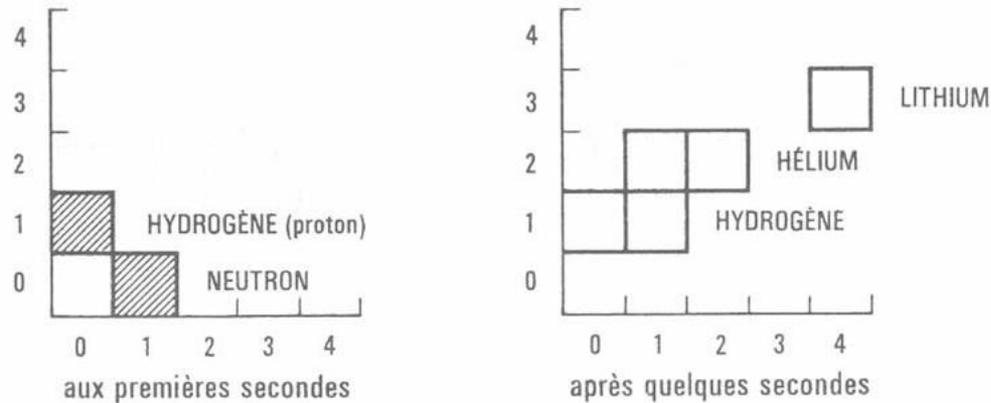
Actinides

89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr
----------	----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

# En résumé

- Éléments légers (H  $\Rightarrow$  Bore) : Big-Bang

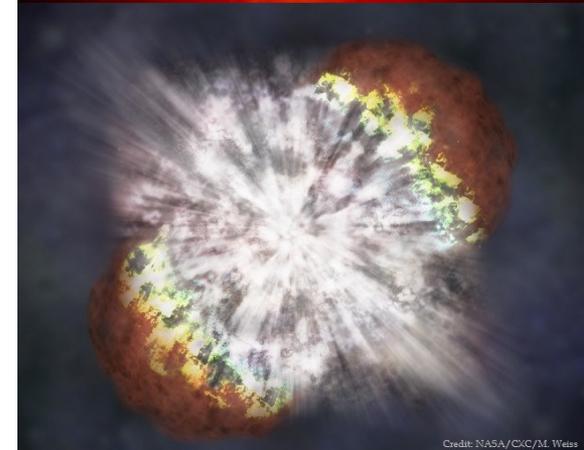
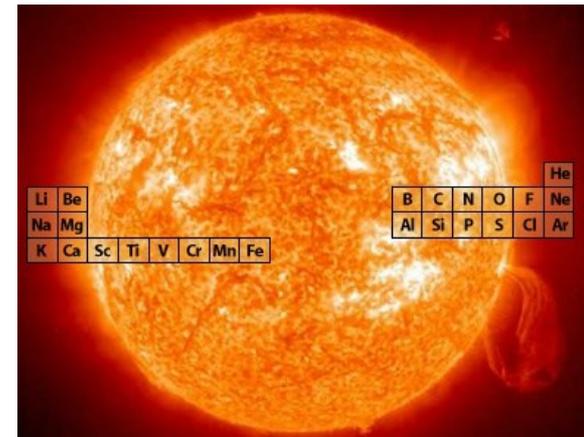
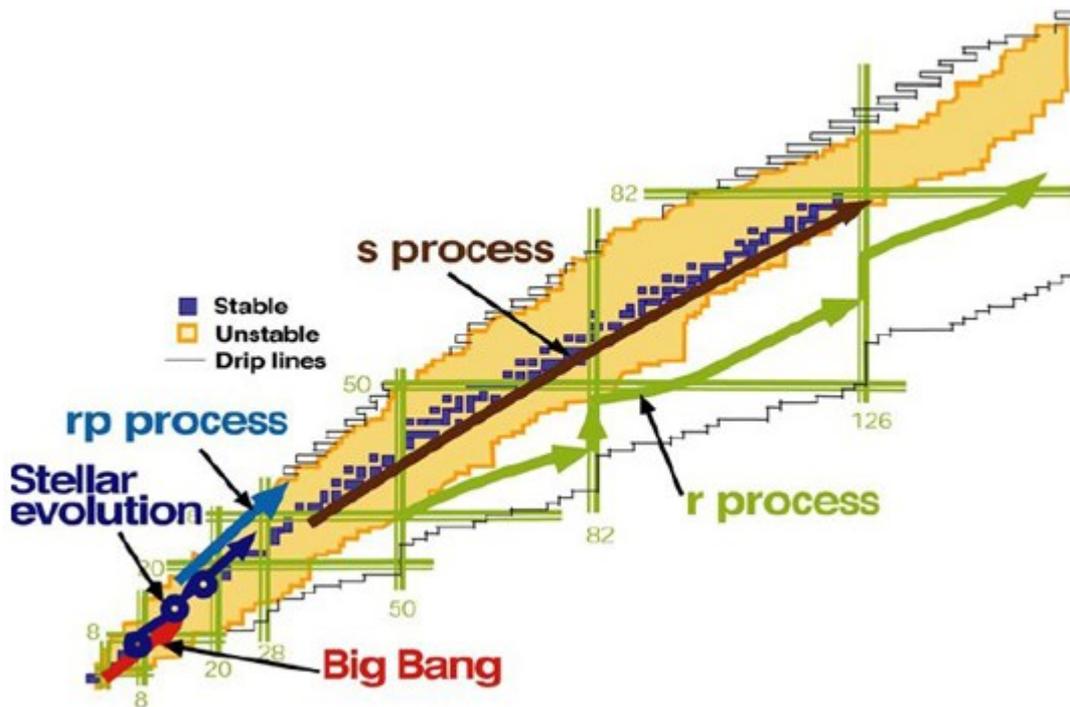
## Nucléosynthèse du big bang



DANS L'EXPLOSION INITIALE

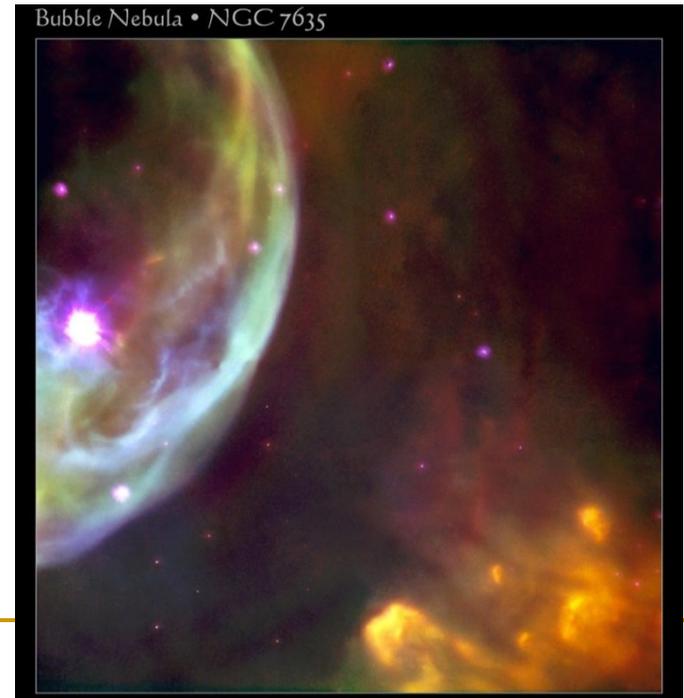
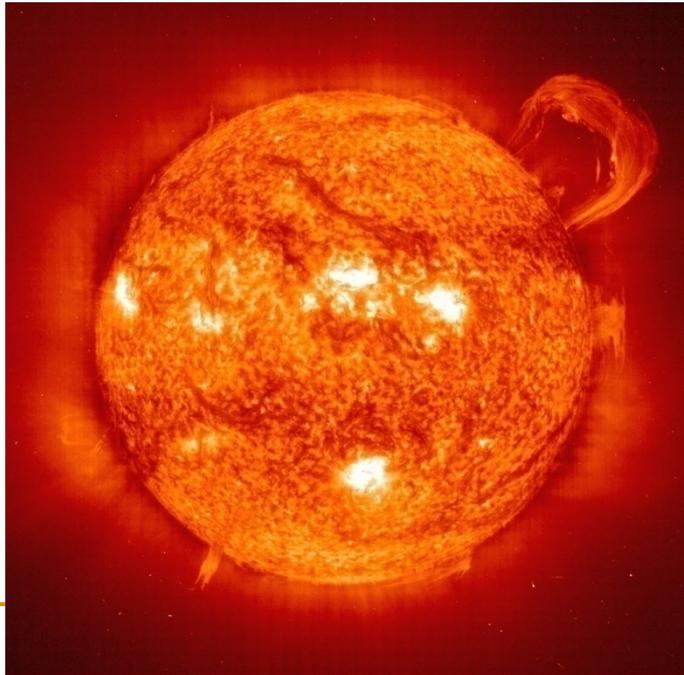
# En résumé

- Eléments légers (H  $\Rightarrow$  Bore) : Big-Bang
- Eléments légers + lourds (He  $\Rightarrow$  Fer + après) : Etoiles massives & Explosion d'étoiles massives (supernovae)



# Étoiles et gaz interstellaire

- Soleil (proportions en masse): 74.5 % H, 23.7 % He, 0.82% O, 0.37% C, 0.19% Ne, 0.09% N, 0.09% Si, 0.06% Mg, 0.13% Fe, 0.04% S, 0.03% reste
- Gaz interstellaire local : abondances très proches de celles du Soleil



---

# En résumé

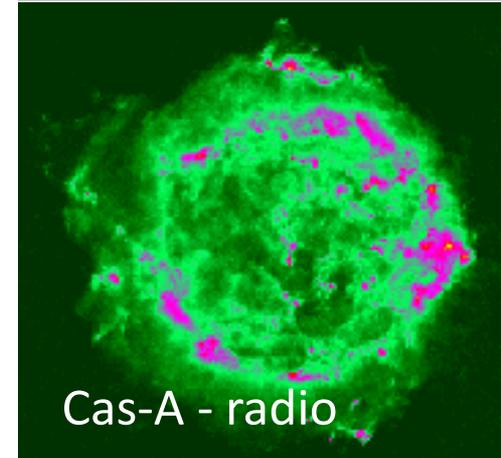
- Éléments légers (H  $\Rightarrow$  Bore) : Big-Bang
  - Éléments lourds (He  $\Rightarrow$  Fer + après) : Etoiles massives + Explosion d'étoiles massives : supernovae
  - Lien avec le vivant ??
-

# Restes de Supernova – poussières d'étoiles

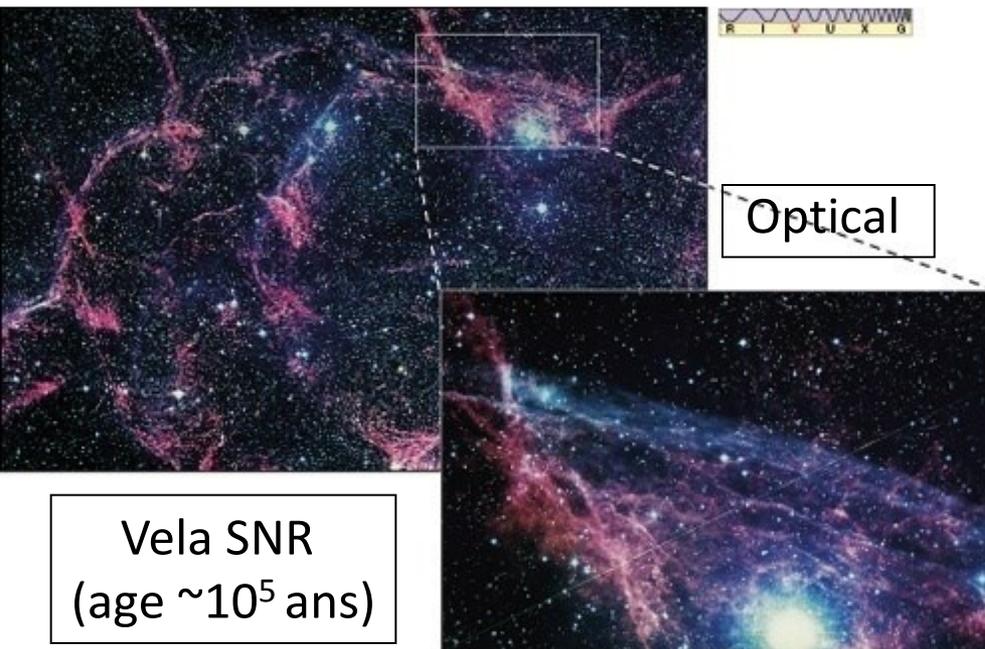
Résidu de l'explosion des étoiles massives :  
Couches externes chaudes éjectées  $\Rightarrow$  chocs avec le milieu interstellaire  $\Rightarrow$  effet boule de neige  $\Rightarrow$  au bout d'un moment ( $10^5$  ans) : mélange avec le MIS.



Crab  $10^3$  ans



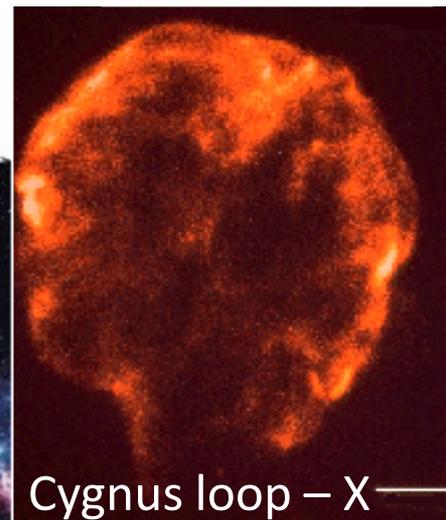
Cas-A - radio



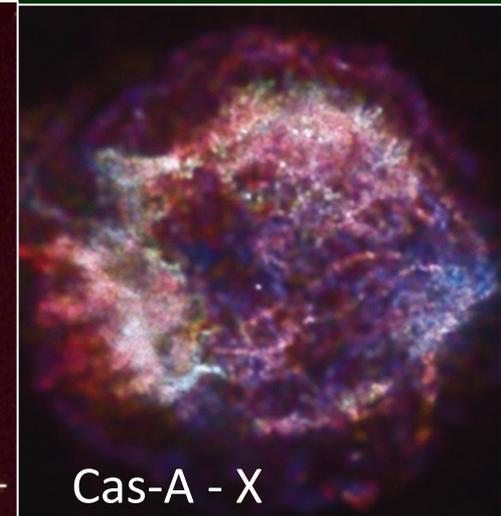
Optical

Vela SNR  
(age  $\sim 10^5$  ans)

Age  $\sim 10^4$  ans



Cygnus loop – X



Cas-A - X