

les éléments chimiques

La Terre dans l'Univers 1

évolution stellaire - le cycle de la matière

évolution stellaire

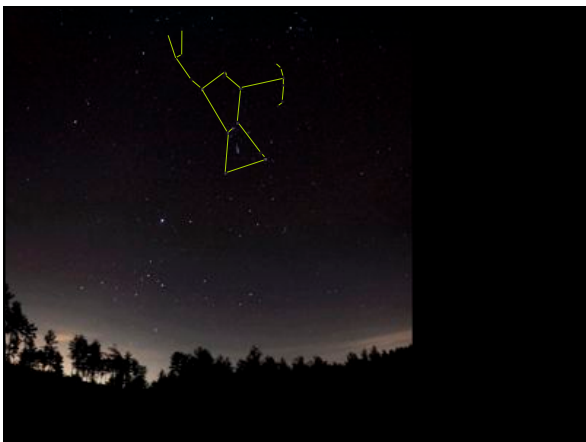
La Terre dans l'Univers 1

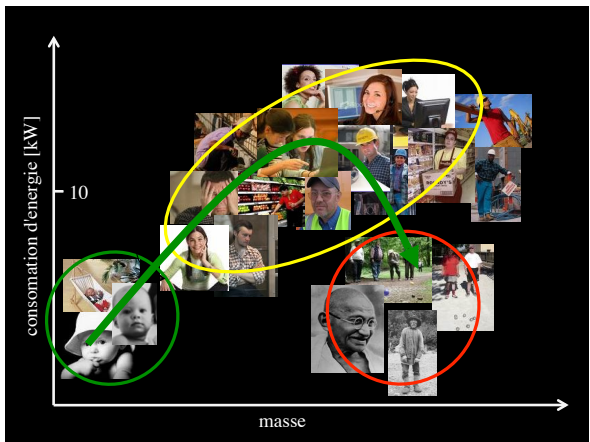
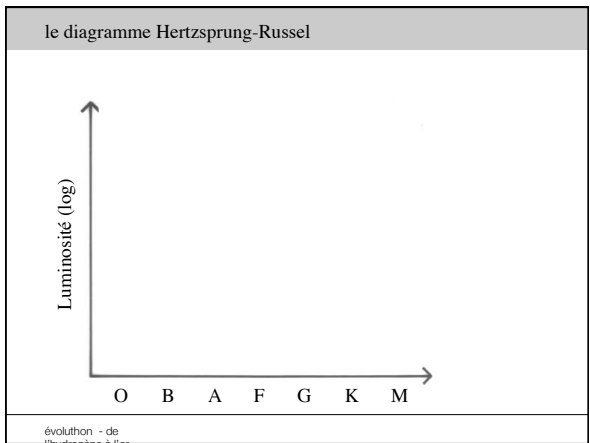
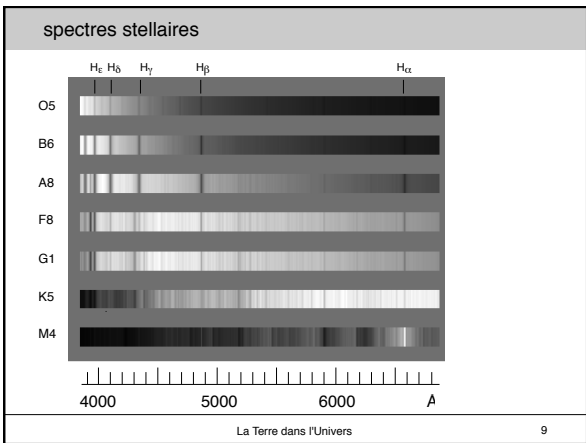
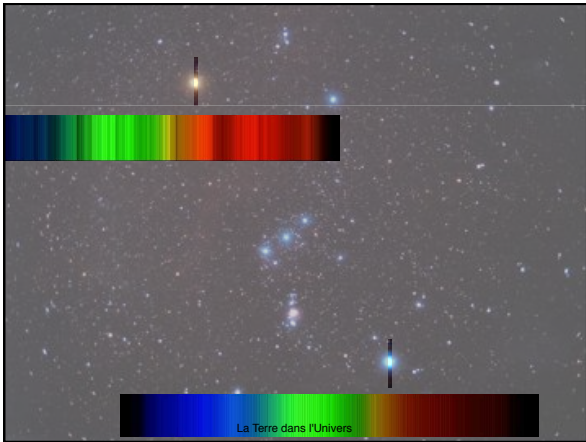
les raies spectrales - 1814 Josef Fraunhofer

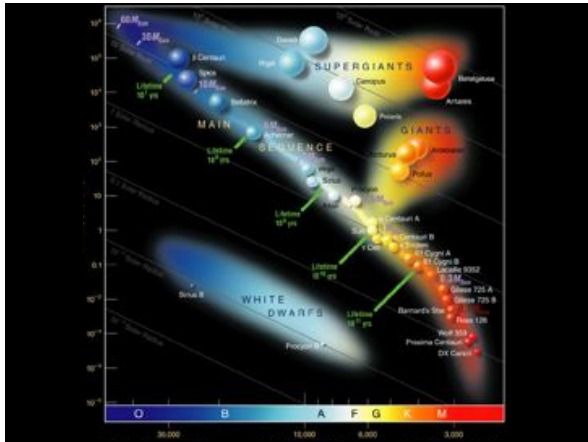
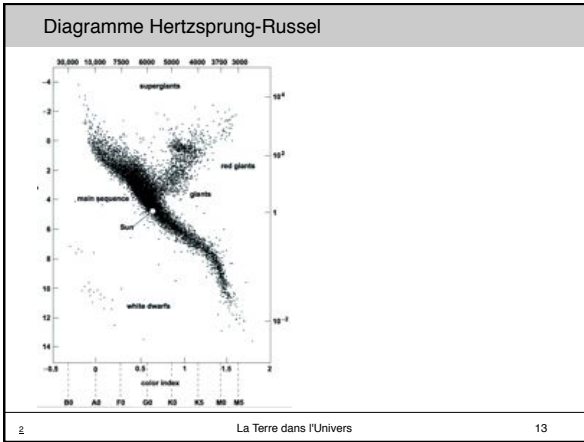
spectre visible du soleil

spectroscopie atomique
-> chimie et physique moderne !

La Terre dans l'Univers 4







La fusion H → He dans le Soleil

$4 \text{ H} \rightarrow 4 \text{ He} + 2 \nu + \text{énergie}$

Le diagramme de Hertzsprung-Russel

Luminosité de l' étoile

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

Surface de l' étoile Luminosité du "corps noir" par unité de surface

Diagramme de Hertzsprung-Russel

La Terre dans l'Univers 16



conditions initiales pour la formation d' une étoile

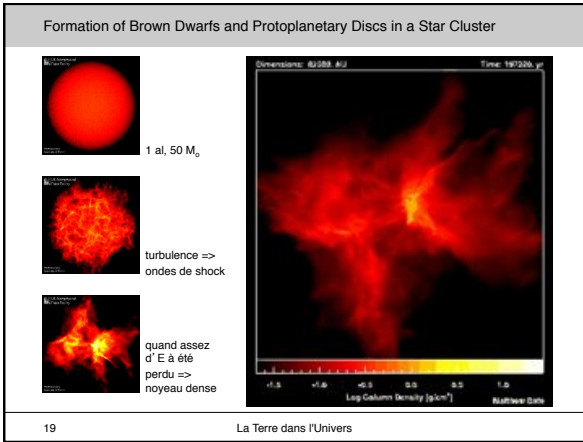
nuage d' atomes d' hydrogène (90 % des atomes dans le MIS)
 masse : 10^{57} atomes d' H ~ 1Mo
 $T \sim 0^\circ$
 $R \sim \infty$

pour le nuage de gaz

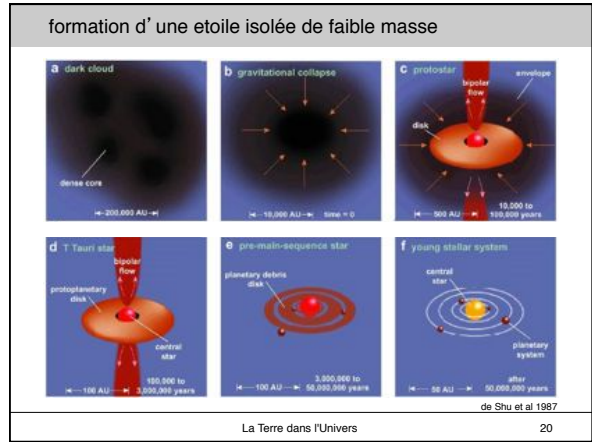
E_{grav}	=	0 (max.)
E_{cin}	=	0
E_{nuc} (pot)	=	938 MeV / nucleon

forces fortes, faibles & EM ~ inactives pour les conditions initiales ci-dessus

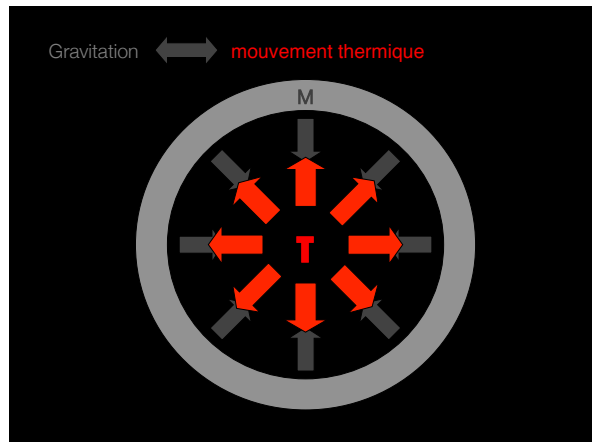
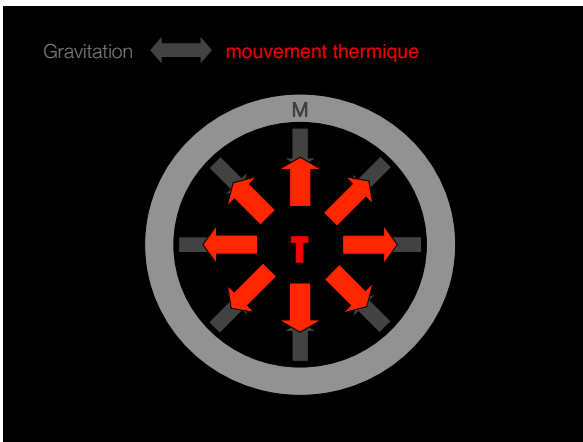
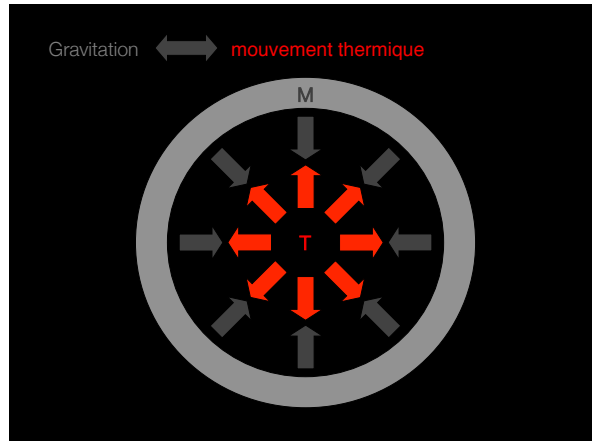
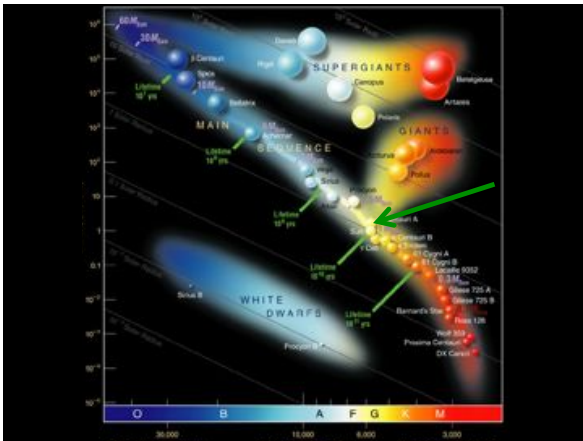
La Terre dans l'Univers 18

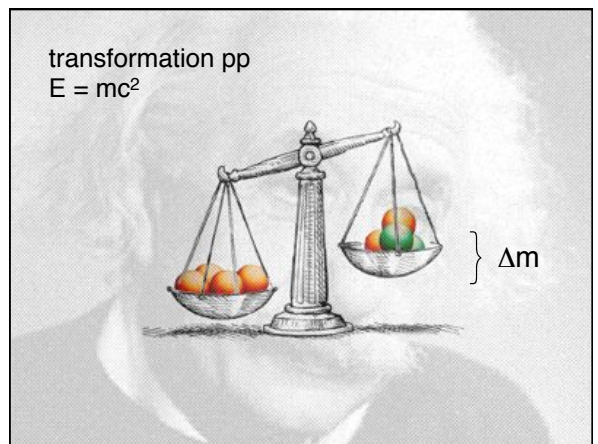
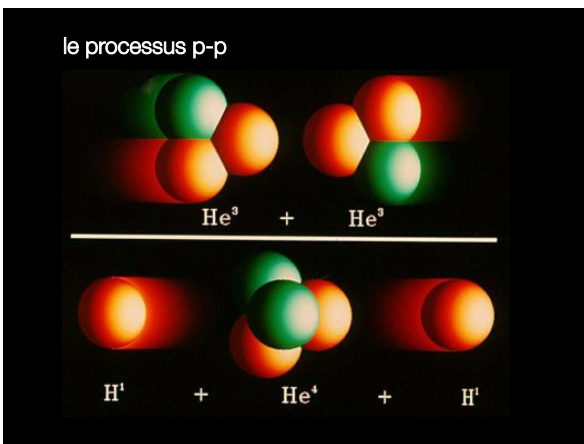
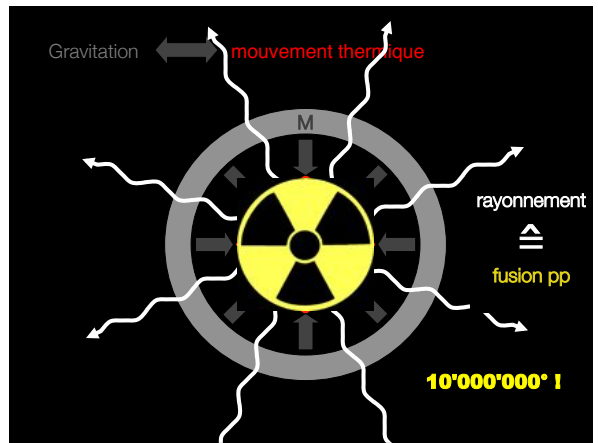
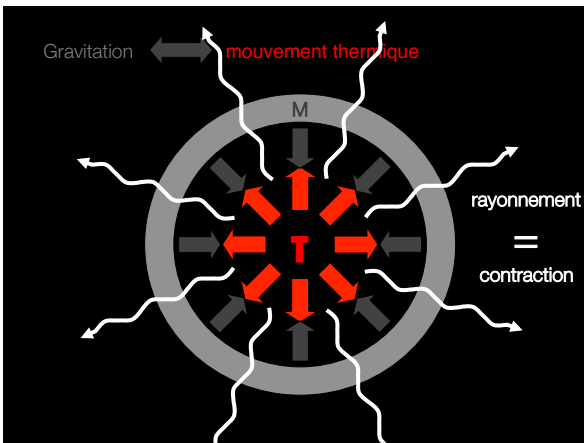
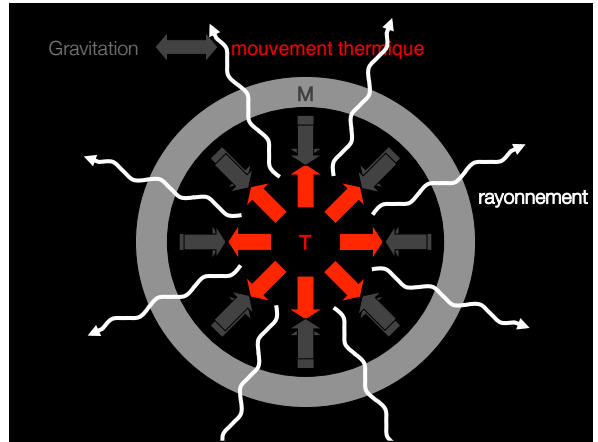
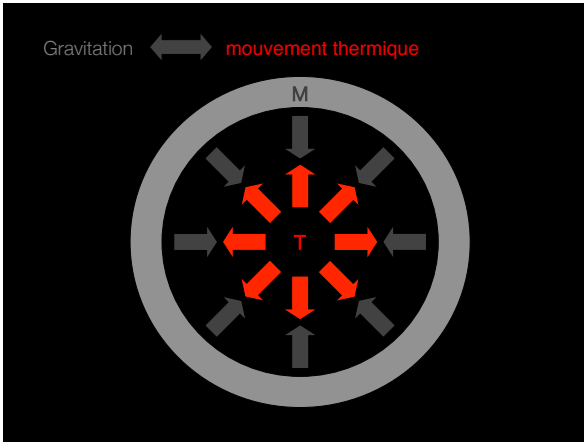


19



20





Réaction p-p			
		énergie libérée* v' s	τ moyen
${}^1\text{H} + {}^1\text{H}$	$\rightarrow {}^2\text{D} + e^+ + \nu$	+ 1.44 MeV - 0.26 MeV	$14 \cdot 10^9$ ans
${}^1\text{H} + {}^2\text{D}$	$\rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$	+ 5.49 MeV	6 s
puis p.e.			
${}^3\text{He} + {}^3\text{He}$	$\rightarrow {}^4\text{He} + 2{}^1\text{H}$	+ 12.86 MeV	$9 \cdot 10^8$ ans
$4{}^1\text{H}$	$\rightarrow {}^4\text{He} + 2\gamma + 2e^+ + 2\nu$	26.72 MeV - 0.52 MeV	

energie produit par H : $E \approx 26 \text{ MeV} / 4 \approx 10^{-12} \text{ J}$

La pression augmente → la contraction (gravitation) s'arrête

la combustion de l'H en He est le plus important reservoir d'energie d'une étoile
=> le soleil reste ~ 10 Ga sur la séquence principale

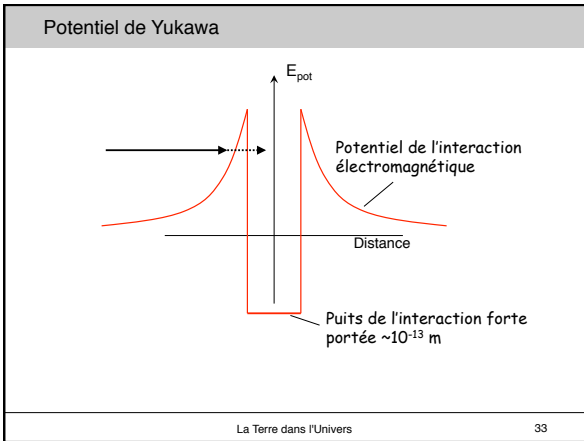
31

La Terre dans l'Univers

Introduction aux Sciences de la Terre et de l'Univers	
www.cesr.fr/~pvb/f/L1Terre	
A. La Terre dans l'Univers	
B. La structure du globe et son exploration	
C. Tectonique des plaques	

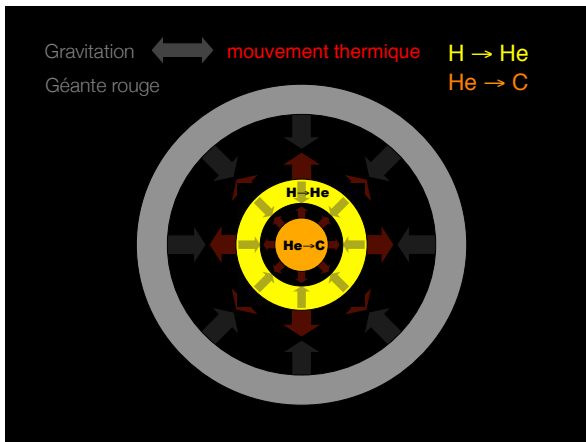
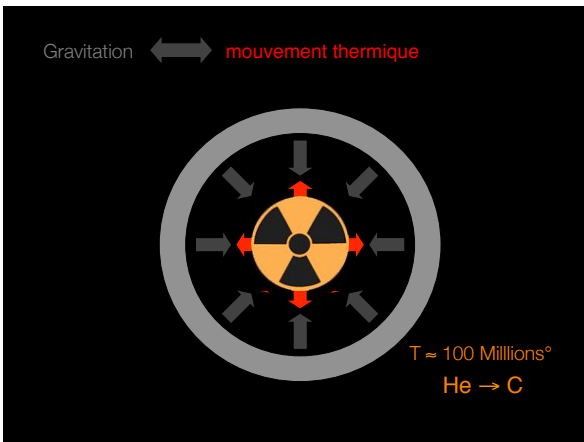
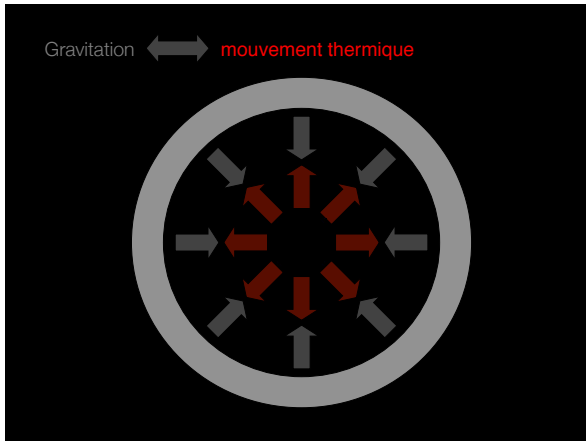
La Terre dans l'Univers

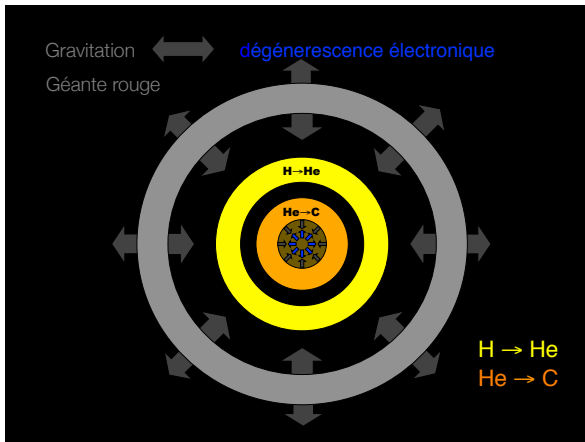
32



La Terre dans l'Univers

33






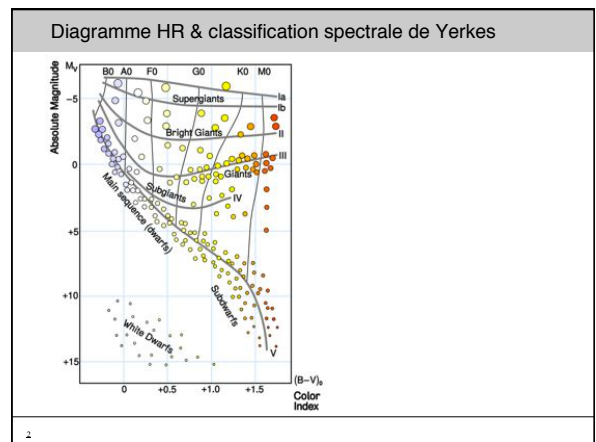
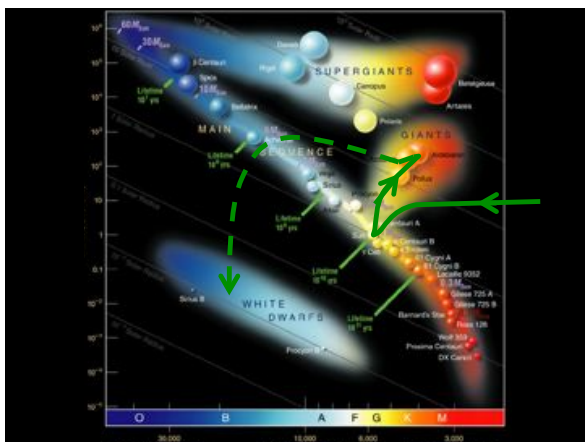
Nébuluse planétaire

→ contraction du cœur et expulsion des couches externes
 Entre le stade de la GR et de la dernière phase (p.e. NB).
 Les Géantes Rouges oscillent -> enveloppe peut recevoir assez d' E_{cin} pour se libérer
 $V_{exp(GR)} \approx 20-30$ km/s (vitesse d'expansion observée dans des nébuleuses planétaires)

→ Nébuluse planétaire :



La Terre dans l'Univers 39



Evolution stellaire : Géante Rouge

- contraction du cœur : T monte dans le cœur
- augmentation de la température / densité autour du cœur : taux pp monte
- luminosité monte de 1000 - 10000
- dilatation et refroidissement de l'enveloppe externe

Si la masse est suffisante ($0.5 M_{\odot}$) :

→ le cœur peut atteindre $\approx 10^8 K$ ($d = 10^5 \text{ kg/cm}^3$) :

réaction triple α , et capture de particules α (noyaux ^4He)

$$^4\text{He} + ^4\text{He} \rightarrow ^8\text{Be}$$

$$^8\text{Be} + ^4\text{He} \rightarrow ^{12}\text{C}^*$$

$$^{12}\text{C}^* \rightarrow ^{12}\text{C} + \gamma$$

→ combustion lente de l'He jusqu'à (presque) épuisement....

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

43 La Terre dans l'Univers

évolution stellaire et diagramme HR - $M < 1.5 M_{\odot}$

1-2 **séquence principale**
H → He au noyau par p-p, noyau s' enrichit en H

2-3 **contraction du noyau**, T_{γ} augmente,
H → He continue dans enveloppe

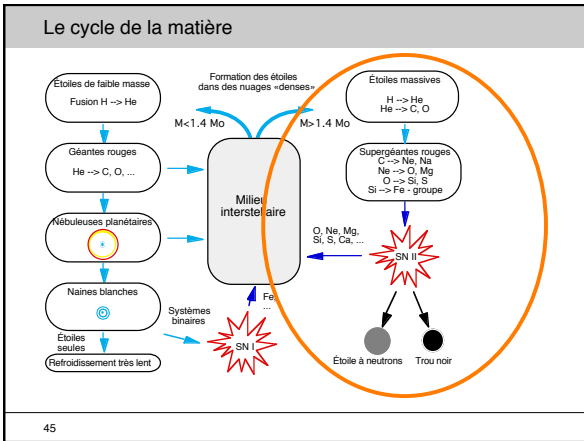
3-5 **vers la géante rouge**
source d'énergie dans l'enveloppe, T_{noyau} augmente,
enveloppe en expansion, T_{surf} diminue ⇒ L ~ const.

5-6 **contraction gravitationnelle du noyau fait augmenter**
 T_{noyau} jusque $T_{\text{noyau}} \sim 10^8 \text{ K}$, $R_{\text{enveloppe}}$ et L augmentent

6 **flash hélium**
processus 3α au noyau (He → C)
expansion du noyau diminue combustion de l' H dans enveloppe, $R_{\text{enveloppe}}$ et L diminuent

7-10 **processus 3α d'abord dans le noyau, plus tard**
deux couches de combustion : H → He, processus 3α ...

La Terre dans l'Univers 44



Evolution stellaire : Supergéantes

→ contraction
→ augmentation de la température et de la densité du cœur :

combustion du carbone $T > 8 \cdot 10^8 \text{ K}$
(après épuisement de la combustion de l'He -
les noyaux prédominants (qui sont le C et le O) prennent le relais

$$^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{24}\text{Mg} + \gamma$$

combustion de l'oxygène

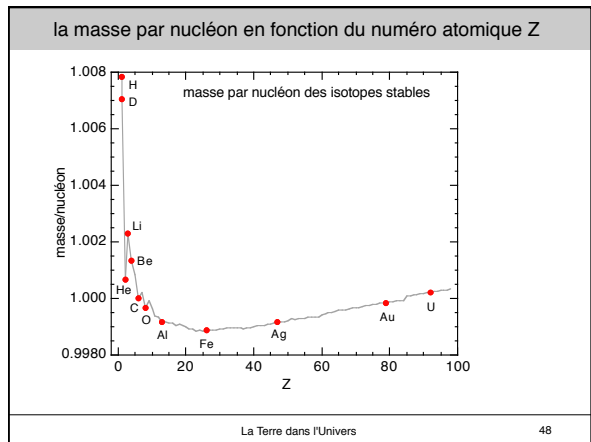
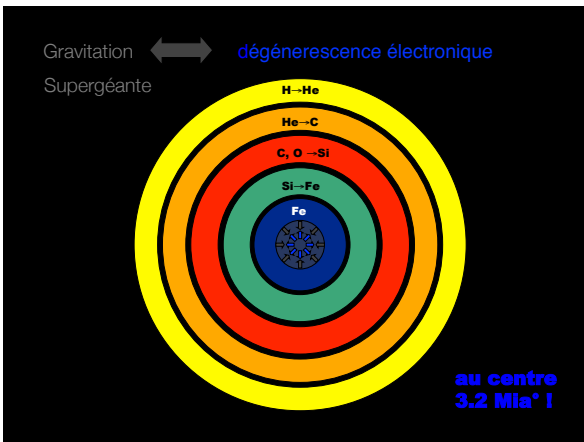
$$^{16}\text{O} + ^{16}\text{O} \rightarrow ^{32}\text{S} + \gamma \rightarrow ^{28}\text{Si} + ^4\text{He}$$

combustion du silicium

$$^{28}\text{Si} + ^{28}\text{Si} \rightarrow ^{56}\text{Ni} + \gamma$$

$$^{56}\text{Ni} \text{ (CE } t_{1/2} = 6.4 \text{ j)} \rightarrow ^{56}\text{Co} \text{ (} t_{1/2}^* = 77.3 \text{ j)} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$$

46 La Terre dans l'Univers



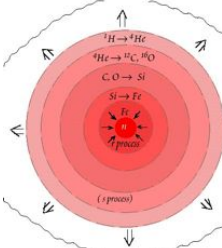
Evolution stellaire : Supernova 1987A



© Anglo-Australian Observatory

La Terre dans l'Univers 49

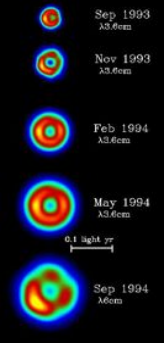
Evolution stellaire : Supernova !



$^{28}\text{Si} + ^{28}\text{Si} \rightarrow ^{56}\text{Ni}$
 $^{56}\text{Ni} \text{ (CE } t_{1/2}=6.4 \text{ j)} \rightarrow ^{56}\text{Co} \text{ (}\beta^+ t_{1/2}=77.3 \text{ j)} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$
 à $T > 3 \cdot 10^9 \text{ K} \Rightarrow$ nouvelles **pertes d'énergie** :
photodésintégration à $T \approx 5 \cdot 10^9 \text{ K}$
 $\gamma + ^{56}\text{Fe} \rightarrow 13^4\text{He} + 4 \text{ n} + 2.2 \text{ MeV/nuc}$
production de paires
 $\gamma \rightarrow e^- + e^+$
échappement de neutrinos
 $e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$
 $e^- + e^+ \rightarrow \nu + \bar{\nu}$ (branchement 10^{-20})

La Terre dans l'Univers 50

Evolution stellaire : Supernova !





Sep 1993 $\lambda 3.6 \mu\text{m}$
 Nov 1993 $\lambda 3.6 \mu\text{m}$
 Feb 1994 $\lambda 3.6 \mu\text{m}$
 May 1994 $\lambda 3.6 \mu\text{m}$
 Sep 1994 $\lambda 6 \mu\text{m}$
 0.1 light yr

\Rightarrow refroidissement devient effet volumique !
 \Rightarrow noyau en contraction rapide
 capture des e^- par les protons
 $p + e^- \rightarrow n + \nu$
 processus inverse n'a pas lieu : les ν s'échappent
 les **neutrons** interagissent avec les **noyaux** présents pour former les **éléments plus lourds que le fer**
 \rightarrow la **matière est éjectée** dans l'espace interstellaire

2 La Terre dans l'Univers 51

découverte de la matière neutronique

découverte du pulsar CP1919 (période $T=1.333 \text{ s}$) en 1967 par Bell, Hewish avec le radiotélescope de Cambridge

52 La Terre dans l'Univers

Crabe
nébuleuse du pulsar



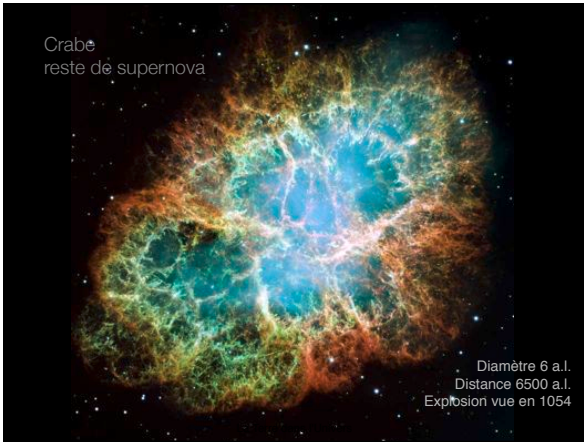
La Terre dans l'Univers

effondrement d'une étoile massive - supernova type II

```

    Effondrement du noyau
    ↓
    Chute libre
    ↓
    Rebondissement du cœur
    ↓
    Onde de choc
    ↓
    L'étoile se sépare en deux
    /      \
  Implosion  Explosion
  /         \
Le noyau   Les restes
  /         \
< 2.5 Mo   > 2.5 Mo
Étoile à   Trou noir
neutrons
  
```

54 La Terre dans l'Univers



Supernova de 1054

Visible en journée pendant 23 jours !

orion
lune
supernova
pléiades

Pétroglyphes indiens relatant l'événement

La Terre dans l'Univers 56

