

# Le monde des étoiles

## Classer les étoiles

- luminosité et température
- diagramme de Hertzsprung-Russell

## Le Soleil

- une étoile banale
- nucléosynthèse, sources d'énergie stellaire

## Les étoiles

- évolution des étoiles
- formation des étoiles

## Evolution des étoiles

Principe général : équilibre interne





Résumé-synthèse des notions évoquées dans le Cours 3

Les étoiles sont **sphériques!**

Elles sont maintenues sous cette forme par une force attractive en  $1/r^2$  :  
mouvements **centripètes** (dirigés vers le centre)

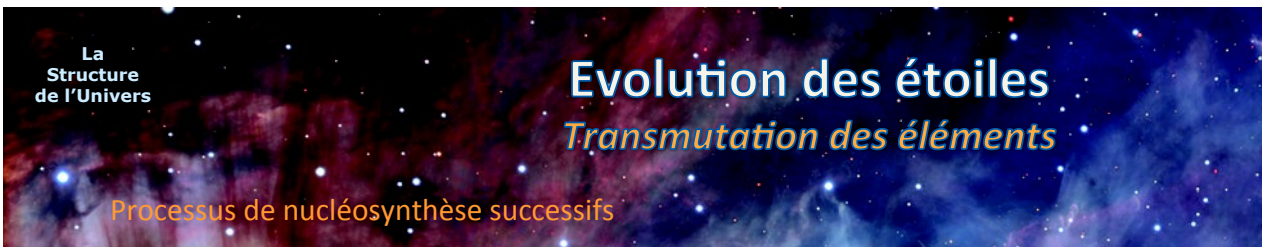
Pourquoi ne s'**effondrent**-elles pas?

Il doit y avoir un gradient (variation monotone) de pression... qui est  
nécessairement associé à un **gradient de température** (gaz parfaits)

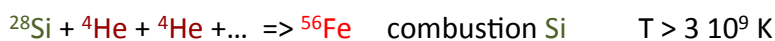
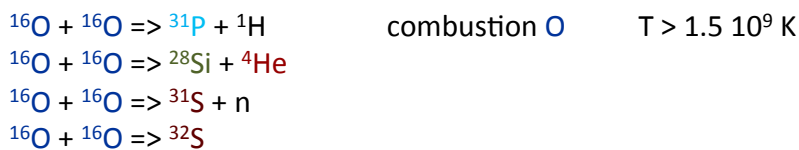
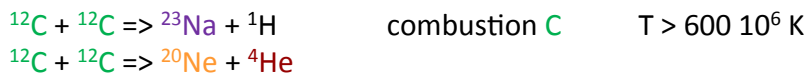
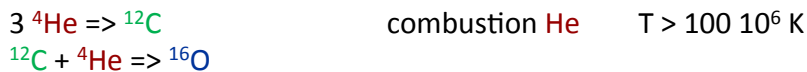
Il doit y avoir une **source d'énergie**

**L'énergie nucléaire** est la seule qui soit suffisamment durable

Il y a **transmutation des éléments** au centre des étoiles



Processus de nucléosynthèse successifs



➤ Processus requérant des **températures de plus en plus élevées** à cause de la  
répulsion coulombienne croissante entre noyaux de charge de plus en plus  
grande



Résumé-synthèse des notions évoquées dans le Cours 3

**Universalité** de la courbe des abondances des éléments chimiques, produits dans toutes les étoiles de l'Univers par les mêmes processus

Evolution des étoiles, due à l'**épuisement du combustible nucléaire**



**Combustible nucléaire disponible**

Les réactions nucléaires **produisent de l'énergie** (réactions exothermiques)

L'énergie produite chauffe le cœur de l'étoile, créant une « **pression thermique** »

La pression thermique équilibre la « **pression gravifique** »

**Combustible nucléaire épuisé**

La pression thermique **n'équilibre plus** la pression gravifique

Le cœur de l'étoile **s'effondre**

Des **températures de plus en plus élevées** sont atteintes (loi des gaz parfaits)

- Nouvelles réactions de fusion: l'épuisement des combustibles entraîne **l'évolution des étoiles**

# Evolution stellaire

*Quelques principes fondamentaux (ter)*

Résumé-synthèse des notions évoquées dans le Cours 3

Etoiles en fin de vie perdent la source d'énergie qui leur assurait la **stabilité** mécanique

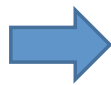
**Ejection** plus ou moins brutale de leur matière dans le milieu interstellaire en phase terminale

**Recyclage** de la matière au sein d'une galaxie

**Evolution chimique** des galaxies

# Evolution des étoiles

**Destin selon la masse**





L'hydrogène est (de loin, 70%) l'élément **le plus abondant** dans les étoiles

La combustion de l'hydrogène est la réaction **la plus accessible** en terme de température (10 millions de degrés)

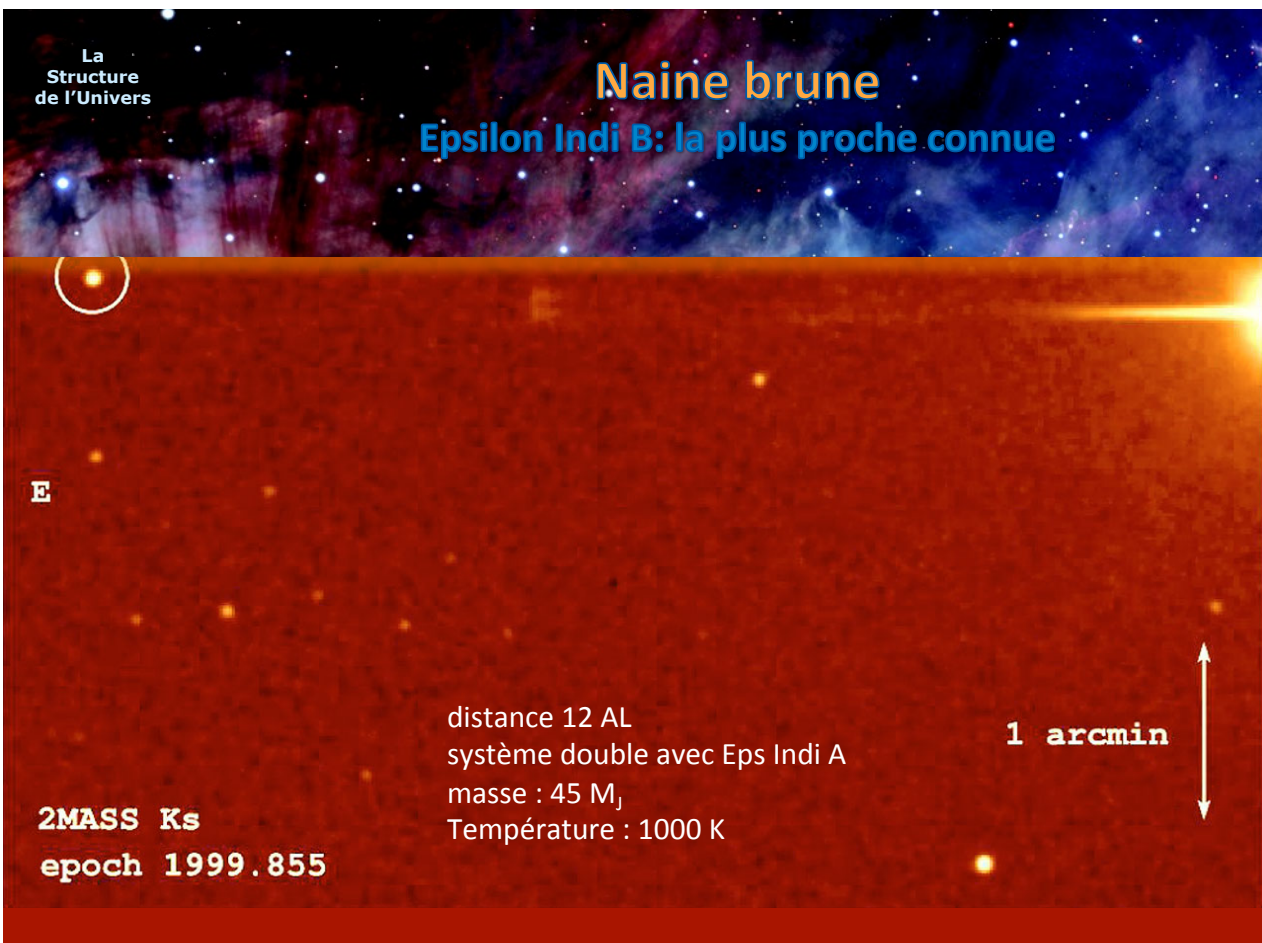
➤ toutes les étoiles débutent leur vie par la **fusion de l'hydrogène en hélium**

### Cas d'un objet de masse insuffisante

Si la masse de l'objet est inférieure à  $0.07 M_{\text{sol}}$ , la température au cœur n'est **pas suffisante** pour initier la combustion de l'hydrogène

Il s'agit d'un **objet substellaire** (pas de statut d'étoile) tirant sa luminosité de l'énergie potentielle gravitationnelle

➤ **naine brune**





La **masse** est le paramètre discriminant entre étoiles d'un côté et objets substellaires (naines brunes, planètes géantes gazeuses, etc) de l'autre

Plus la masse est élevée, plus la **température** et la **pression** au cœur de l'étoile sont grandes

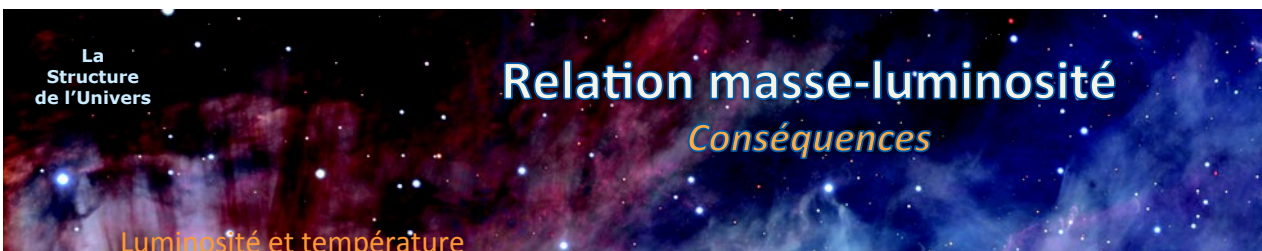
Le **rythme de fusion** de l'hydrogène est alors plus important

La production d'énergie par unité de temps (= la **luminosité**) est alors plus élevée

➤ existence d'une **relation masse-luminosité**

$$L \propto M^{3.9} \quad (M > 1 M_{\text{sol}})$$

$$L \propto M^{3.2} \quad (M < 1 M_{\text{sol}})$$



Relation masse-luminosité (plus une étoile est massive, plus elle produit d'énergie par unité de temps: puissance):

$$L \propto M^{3.2}$$

+ Relation luminosité-rayon-température (loi de Stefan, plus une étoile est grande et chaude, plus elle est lumineuse):

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

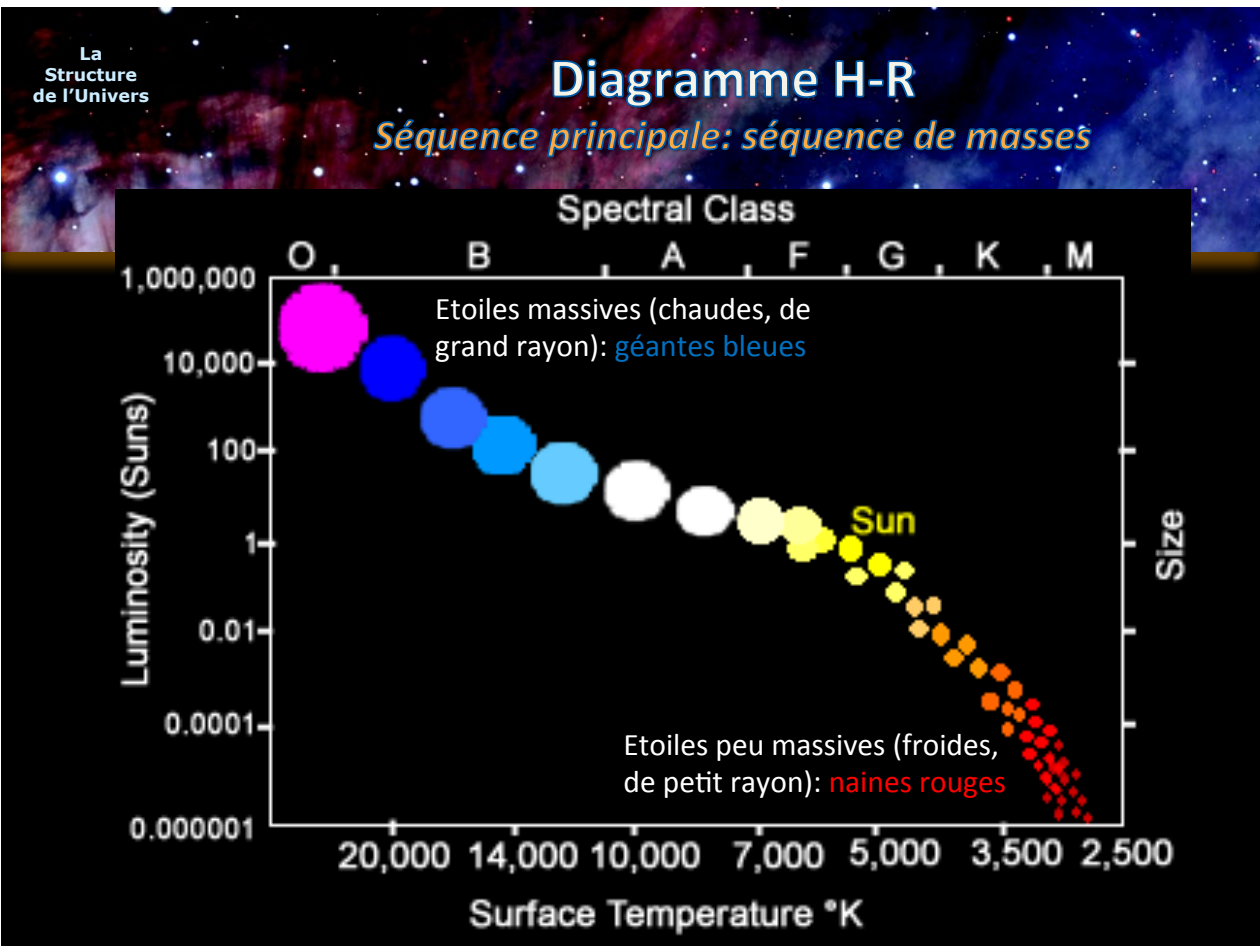
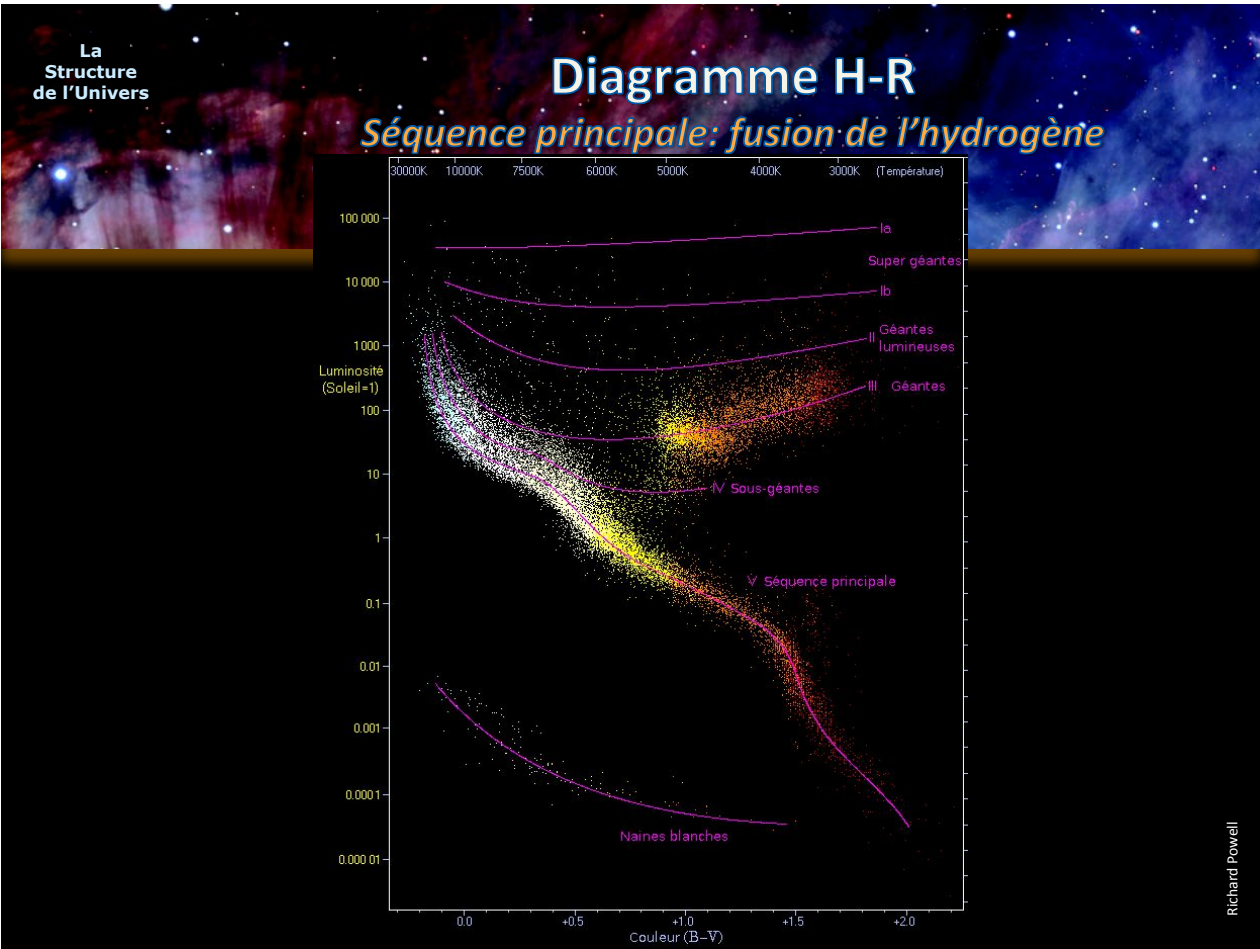
+ Corrélation masse-rayon (à masse volumique équivalente, plus une étoile est massive, plus elle est grande)

$$M \propto R^3$$

➤ il existe pour les étoiles consommant l'hydrogène au cœur une **relation entre la luminosité et la température**

**Courbe  $L = f(T)$  dans diagramme H-R**

L'existence d'une relation entre luminosité et température se matérialise par la présence d'une séquence dans le diagramme H-R: c'est la **séquence principale**





Les étoiles plus massives que le Soleil vivent-elles **plus longtemps** parce qu'elles disposent de plus de combustible?

NON ! Parce que leur **rythme de combustion** (= leur luminosité) est beaucoup **plus rapide** (élevée)

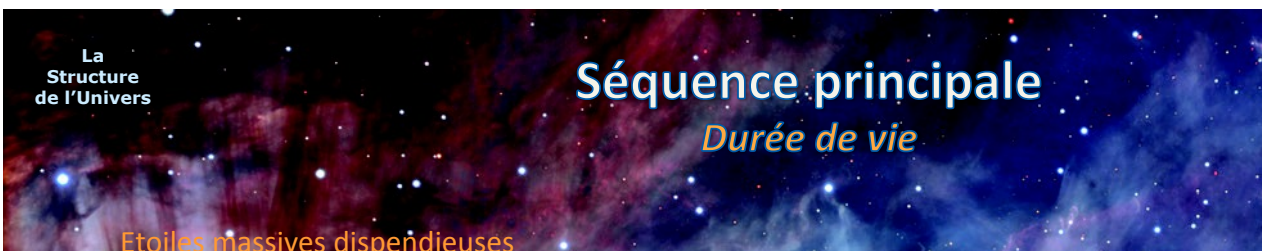
$$L \propto M^{3.5}$$

**Soleil**: taux de réaction nucléaire (conditions T,P) + masse disponible

➤ durée de vie du Soleil sur la séquence principale: **10 milliards d'années**

**Etoile** : durée de vie proportionnelle à la **masse** (quantité de combustible) et inversement proportionnelle à la **luminosité** (rythme de combustion)

$$\Delta t_{seq} (ans) = 10^{10} \frac{M / M_S}{L / L_S}$$



Une étoile de **3 M<sub>s</sub>** (3 fois plus de combustible que le Soleil) possède sur la séquence principale une luminosité de **60 L<sub>s</sub>** (donc combustible brûlé 60 fois plus rapidement)

$$\Delta t_{seq} (ans) = 10^{10} \frac{M / M_S}{L / L_S}$$

Durée de vie:  $10^{10} \times 3/60 =$  **500 millions d'années** (1/20 du Soleil)

**Etoiles peu massives parcimonieuses**

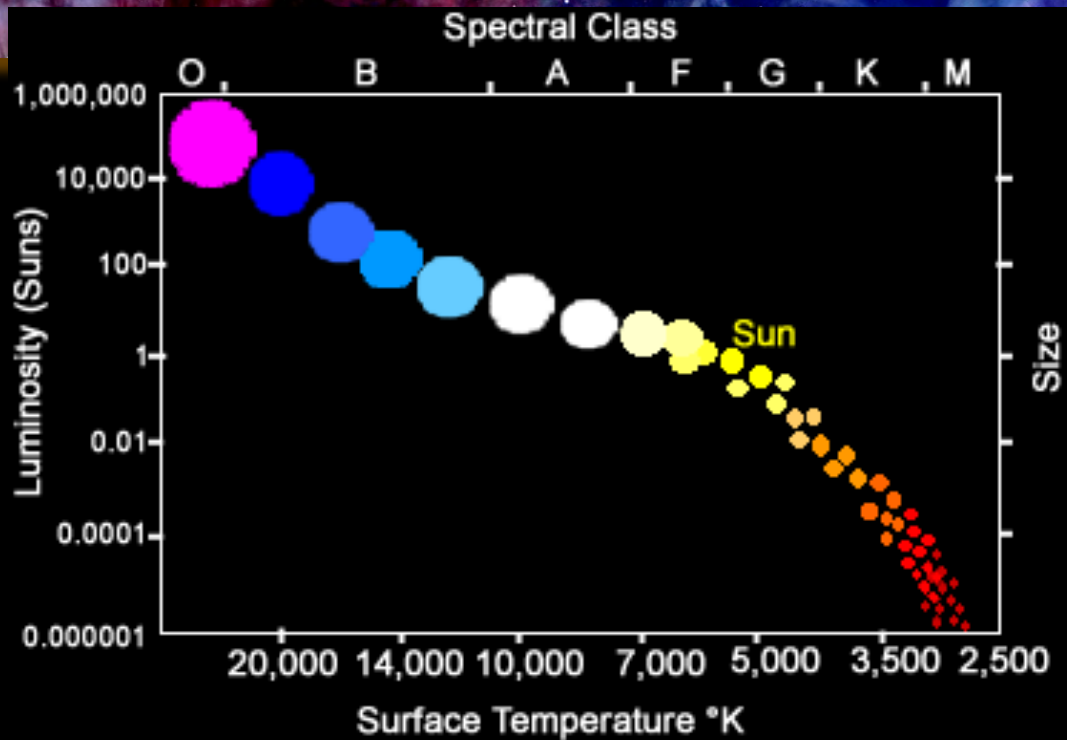
Durée de vie des étoiles de 0.4 à 25 M<sub>s</sub> :

Masse (M <sub>⊙</sub> )	L (L <sub>⊙</sub> )	† (10 <sup>9</sup> ans)
25	90 000	0.003
15	10 000	0.015
3	60	0.5
1	1	10
0.4	0.02	200 !



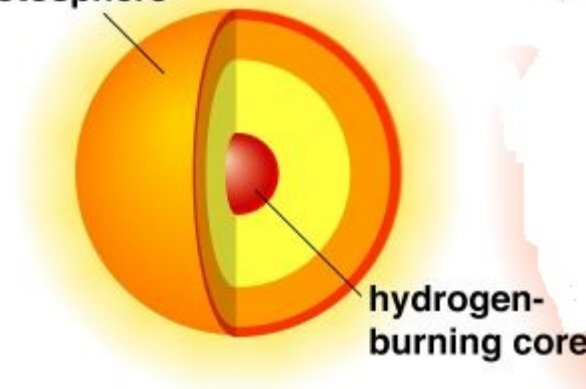
## Séquence principale d'âge zéro

*Evolution au cours du temps*



## Etoile de type solaire

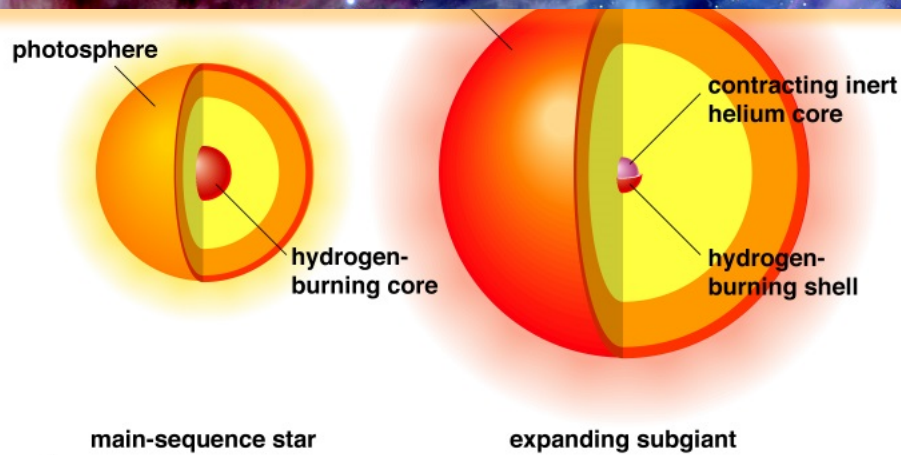
photosphere



Etoile de  $1 M_{\text{soleil}}$ : combustion centrale de l'hydrogène en hélium pendant 10 milliards d'années

➤ naine de la séquence principale

# Etoile de masse solaire



**Epuisement de l'hydrogène au centre:** contraction du cœur d'hélium + combustion périphérique de l'hydrogène + expansion de l'enveloppe

➤ **géante rouge**

## Phase géante rouge *Expansion de l'enveloppe*

### Evacuation du flux d'énergie

L'énergie produite par la combustion de l'hydrogène en couche et la contraction gravitationnelle du noyau d'hélium provoque le « **gonflement** » de l'étoile afin d'évacuer plus efficacement le flux d'énergie (~ mesure d'urgence)

La luminosité demeure à peu près constante: la **loi de Stefan** implique que l'augmentation de  $R^2$  est compensée par la diminution de  $T^4$

- l'augmentation de rayon (l'étoile devient **géante**) (rayon Soleil = orbite de Vénus) s'accompagne de la diminution de la température de surface (l'étoile devient froide = **rouge**) (Soleil:  $T_{\text{surface}} = 4000 \text{ K}$ )

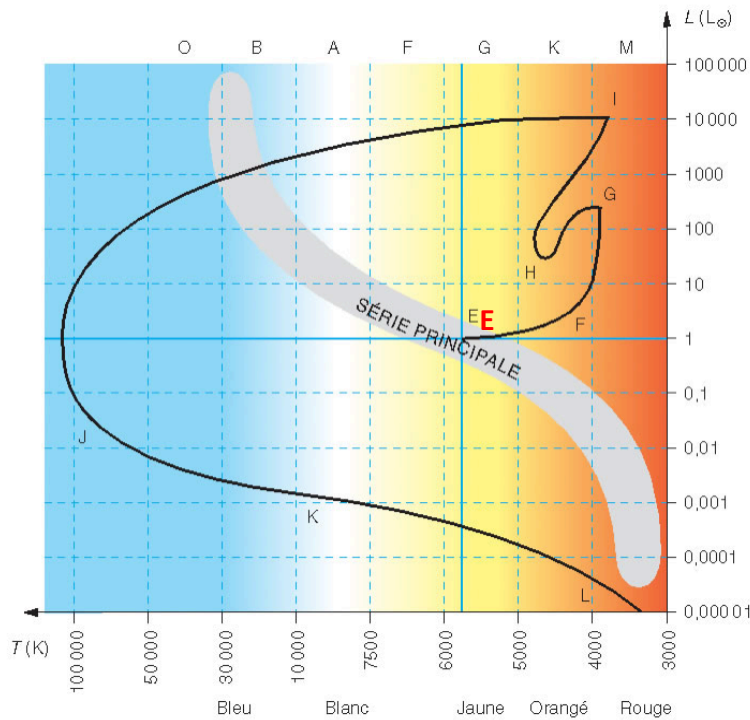
### Evacuation plus efficace de l'énergie

Le démarrage de la **convection** permet à toute l'énergie produite d'être amenée efficacement en surface: la **luminosité augmente** très sensiblement (Soleil:  $L = 100 L_{\odot}$ )

- l'étoile se « **déplace** » dans le **diagramme H-R** (reflet de l'évolution)

# Evolution dans le diagramme H-R

*Etoile de masse solaire: naine jaune*



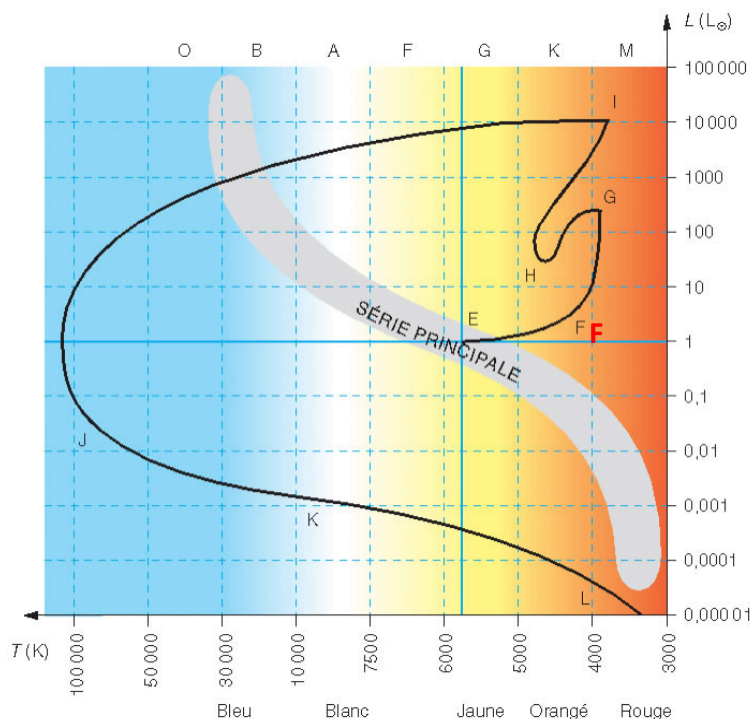
**E** : fin de la séquence principale  
= fin de la combustion centrale de H

âge: 10 milliards d'années

cœur d'hélium

# Evolution dans le diagramme H-R

*Etoile de masse solaire: géante rouge*



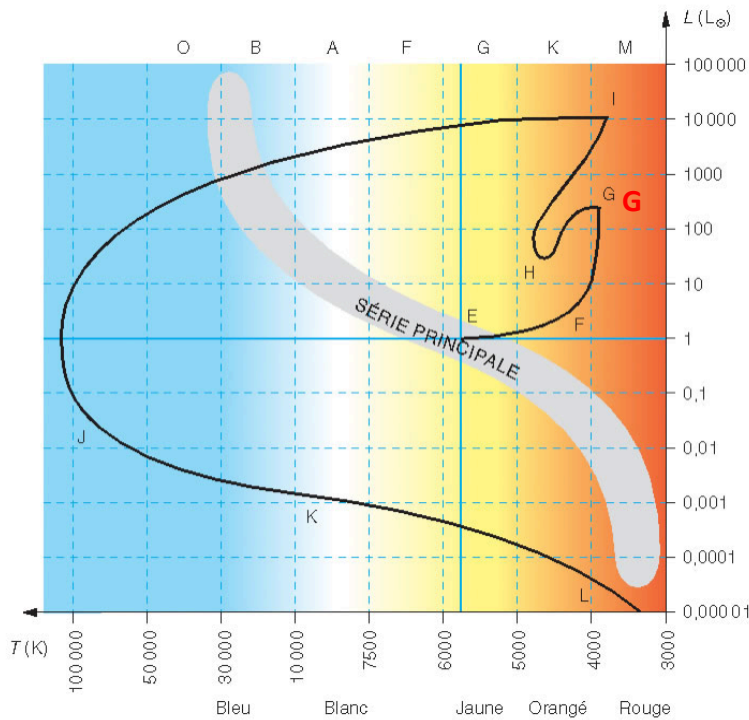
**F** : début de la phase géante rouge  
= combustion périphérique de H

âge: 10.2 milliards d'années

cœur d'hélium

# Evolution dans le diagramme H-R

*Etoile de masse solaire: géante rouge*



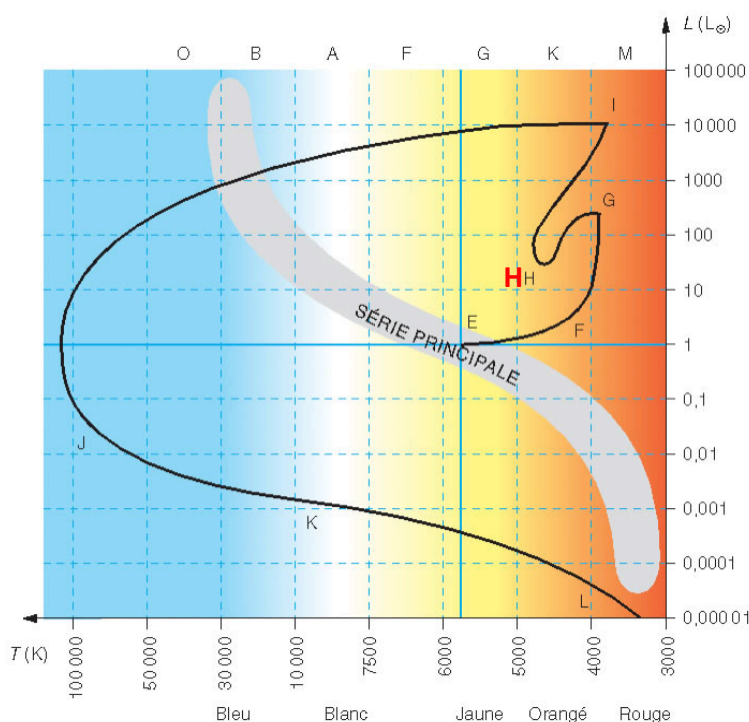
**G** : flash de l'hélium = démarrage brutal de la combustion de He

âge: 10.5 milliards d'années

vers un cœur carbone-oxygène

# Evolution dans le diagramme H-R

*Etoile de masse solaire: géante rouge*



**H** : branche horizontale = combustion centrale de He

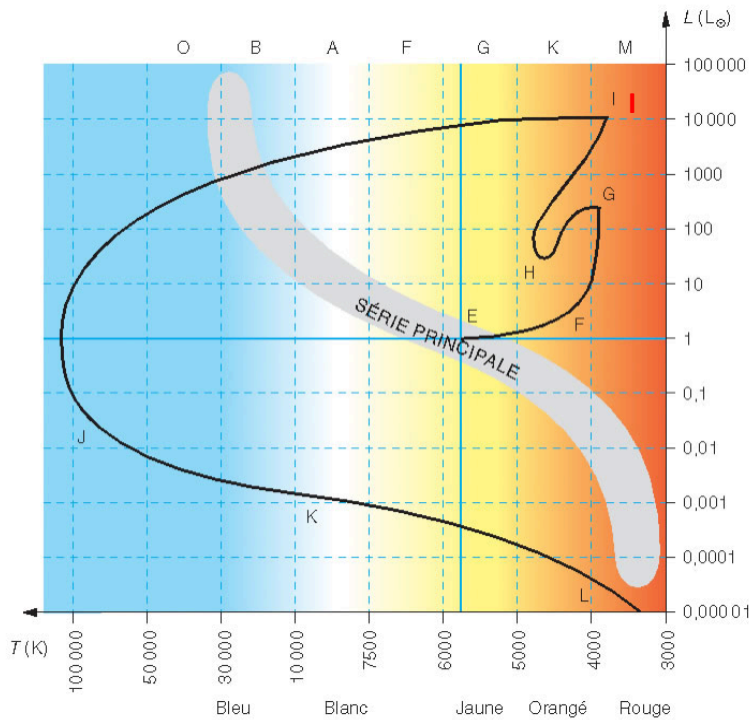
âge: 11.5 milliards d'années

L'ensemble des étoiles de différentes masse considérées durant cette phase = « séquence principale He »

vers un cœur carbone-oxygène

# Evolution dans le diagramme H-R

## Etoile de masse solaire: géante rouge asymptotique

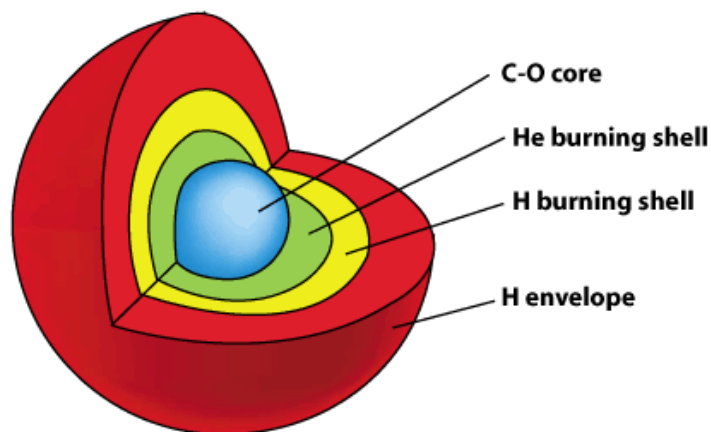


I : branche asymptotique des géantes = combustions périphériques de H et He

âge: 11.8 milliards d'années

cœur carbone-oxygène

# Etoile évoluée de masse solaire



**Combustion en couches:** combustions périphériques de l'hélium et de l'hydrogène autour d'un cœur carbone-oxygène inactif

➤ géante rouge de la branche asymptotique des géantes

### Cœur carbone-oxygène

Le cœur CO est un noyau dense composé de noyaux atomiques (carbone, oxygène) et d'**électrons**

Le **principe d'exclusion de Pauli** (mécanique quantique) empêche des électrons d'occuper le même état. Ils ne peuvent pas être au même « endroit » ( $\sim$  cas de la matière très dense) et avoir la même vitesse

Les électrons « dégénérés » ont une distribution de vitesses supérieure à la normale (i.e. dictée par la température) : **pression de dégénérescence**

En dessous de  $8 M_{\odot}$  (étoiles de faible masse et de masse moyenne), la pression de dégénérescence stoppe la pression gravifique: la **contraction du cœur CO est arrêtée** par le principe d'exclusion de Pauli pour les électrons

➤ pas de nouvelle réaction nucléaire possible : **arrêt de la nucléosynthèse**

*Le principe d'exclusion de Pauli pour les électrons empêche l'effondrement du cœur CO après la combustion de l'hélium dans les étoiles peu massives*

### Ejection de l'enveloppe

Durant la phase branche asymptotique des géantes:

- la faible gravité à la surface (car étoile géante: grand rayon,  $g = GM/R^2$ ),
- la formation de poussières (car température de surface froide: formation de molécules, etc.)
- et l'instabilité de l'enveloppe (pulsations, chocs)

font que de forts vents stellaires (éjection de matière) ont lieu à la surface de l'étoile

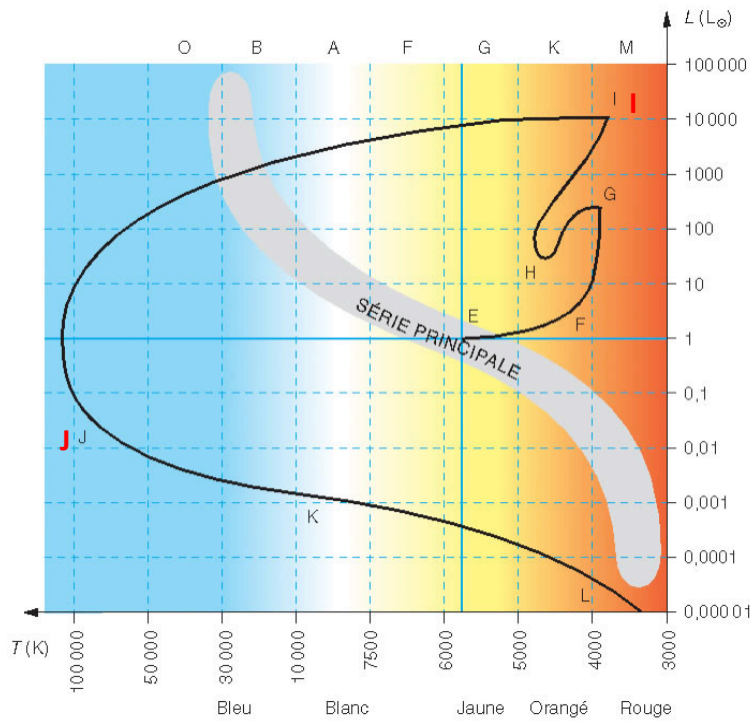
Les enveloppes H et He finissent par être complètement **expulsées**, laissant le cœur CO à nu

Ce cœur chaud et lumineux (radiation UV) **ionise** les couches de l'enveloppe expulsées : matière stellaire « libre » illuminée

➤ **nébuleuse planétaire** (aucun rapport avec les planètes!)

# Evolution dans le diagramme H-R

Etoile de masse solaire: nébuleuse planétaire



I à J : nébuleuse planétaire =  
éjection de l'enveloppe

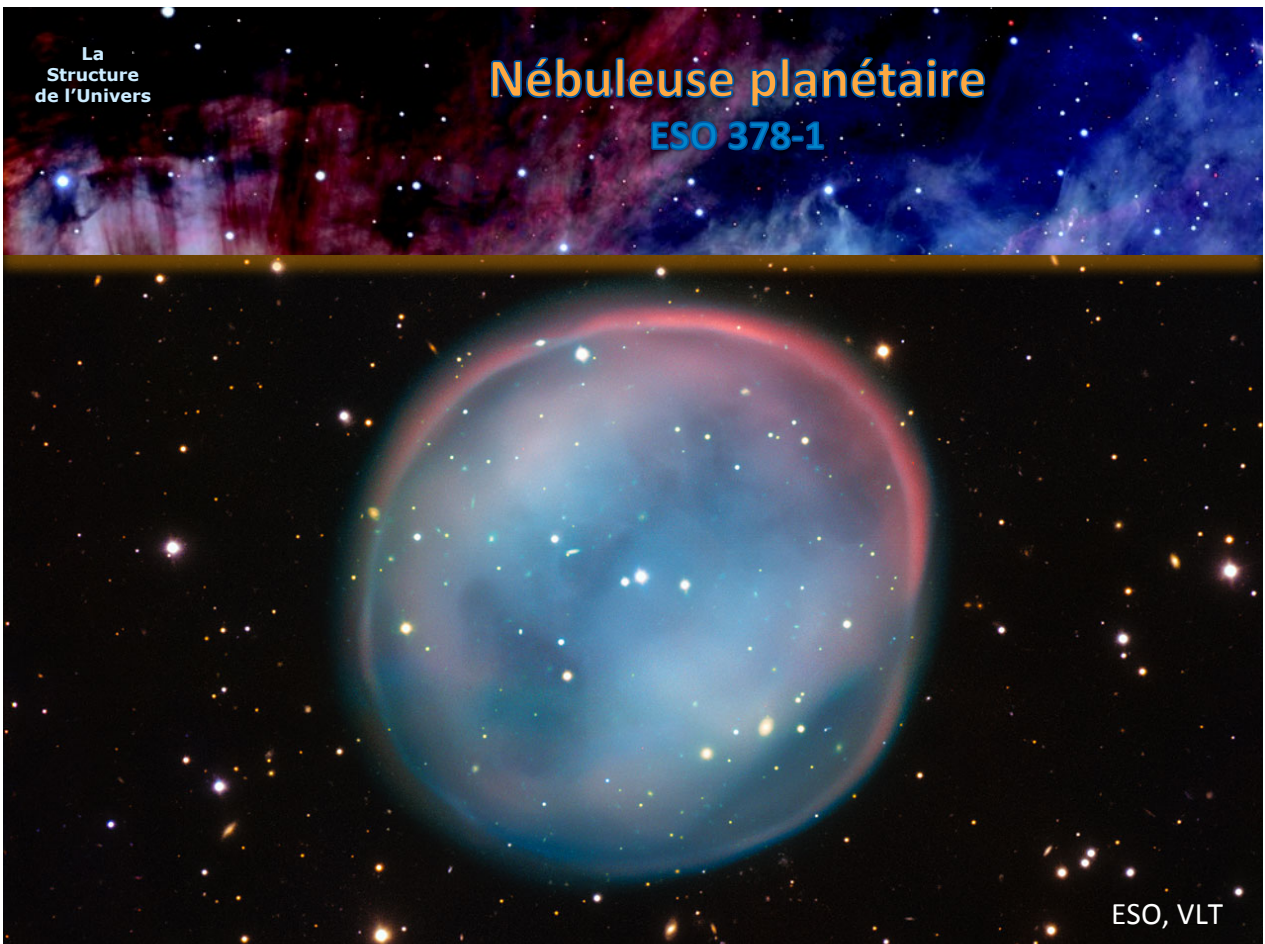
âge: 11.801 milliards d'années

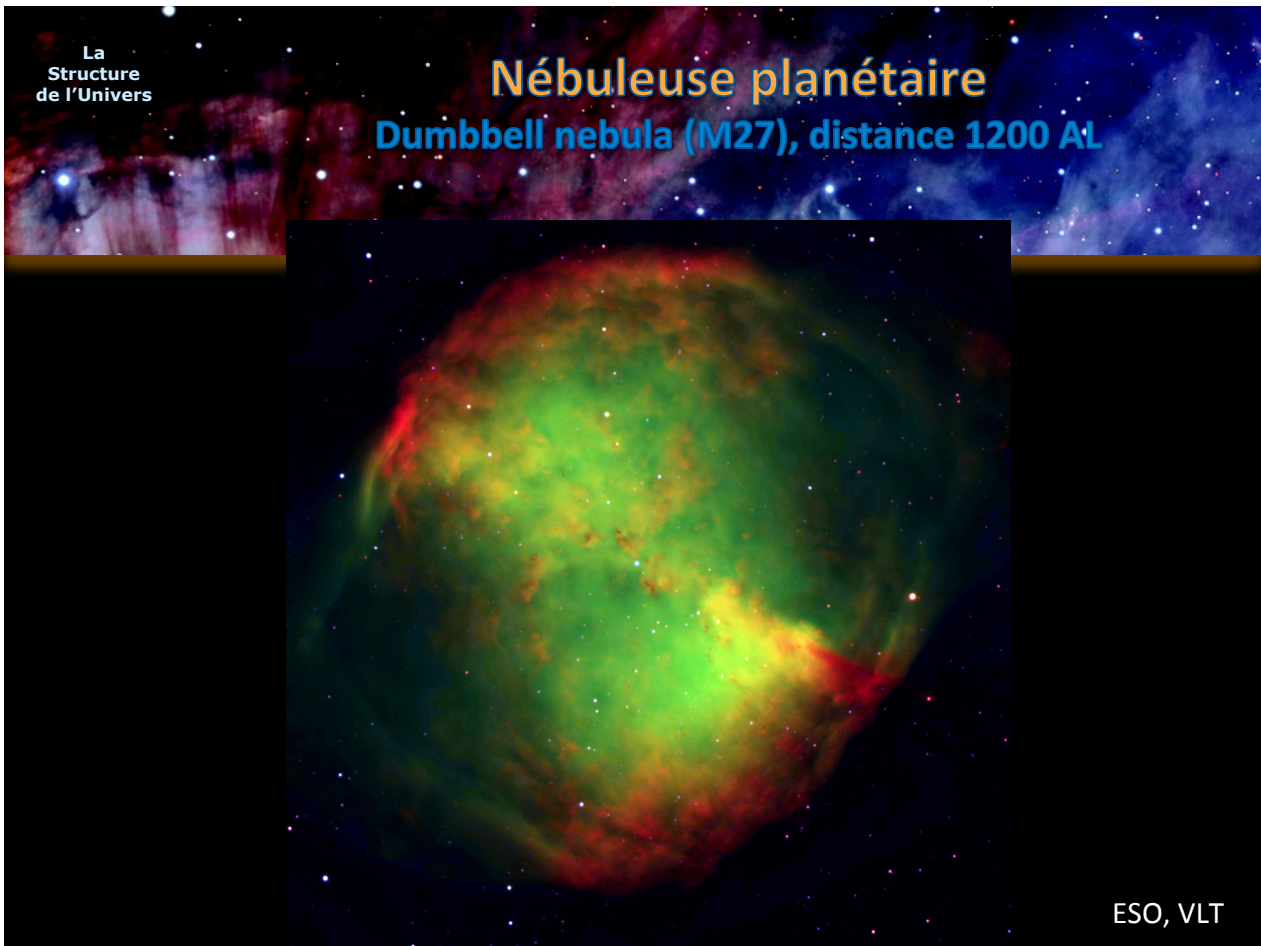
Phase terminale de l'évolution  
d'étoiles de masse initiale  
 $\sim 0.8 - 8 M_{\text{soleil}}$

cœur carbone-oxygène dénudé

# Nébuleuse planétaire

ESO 378-1





Le cœur de CO possède une masse d'environ  $0.6 M_{\odot}$  dans un volume de rayon **1/100 de  $R_{\odot}$**  (soit environ 7000 km :  $\sim$ rayon terrestre), ce qui résulte en une masse volumique de:

$$\rho = 10^6 \text{ g/cm}^3$$

Les orbitales électroniques sont rompues, les électrons sont « **empilés** » les uns sur les autres

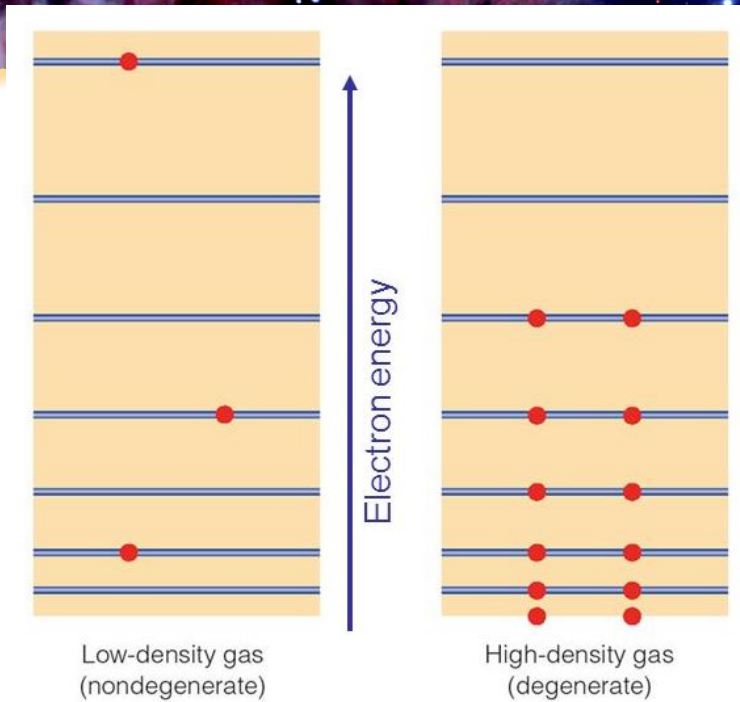
Des électrons confinés dans un volume restreint prennent un ensemble de valeurs **discrètes** (contraire de continues) pour ce qui concerne leur énergie

- **matière dégénérée** (cf. règles de remplissage des orbitales électroniques) dont la pression ne dépend plus de la température



## Matière dégénérée

### Electrons et principe d'exclusion de Pauli



Des électrons « proches » ne peuvent occuper le même état énergie/spin

Figure de droite: un éventuel électron supplémentaire devra occuper un niveau d'énergie plus élevée que ceux déjà complets : **pression de dégénérescence**

## Evolution des étoiles peu massives

### Destin du coeur CO

Cadavre stellaire

L'étoile géant rouge évoluée a laissé la place à une nébuleuse planétaire dont le centre est occupé par un cœur carbone-oxygène:

- de rayon =  $0.01 R_{\odot}$  : très **petit rayon**
- de température élevée : **apparence blanche ou bleutée**

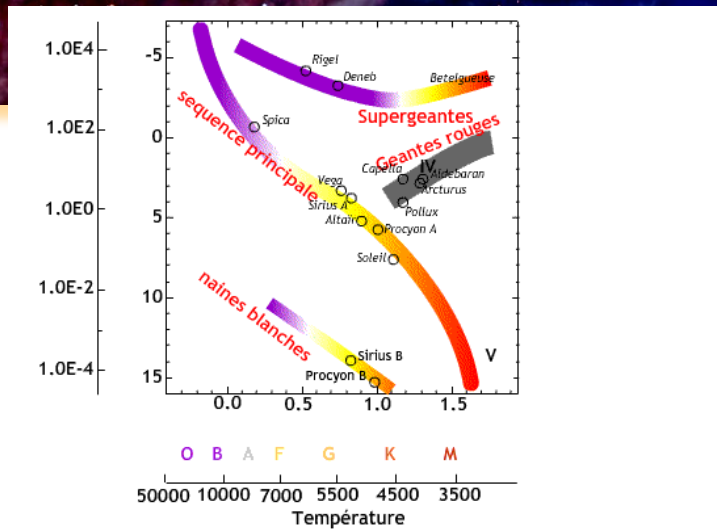
➤ **naine blanche**

Relation **luminosité-température** paramétrée par le **rayon**:

Loi de Stefan :  $L = 4\pi R^2 \sigma T^4 \Rightarrow \log L = 4 \log T + 2 \log R + \text{cste}$

- la séquence des naines blanches est **parallèle** à la séquence principale (et à la séquence des géantes  $R = 100 R_{\odot}$ ) dans un diagramme  $\log L = f(\log T)$

# Loi de Stefan et diagramme H-R



**Diagramme  $\log L = f(\log T)$ : géantes, séquence principale, naines blanches** => séquences de même pente, mais d'ordonnée à l'origine liée au rayon caractéristique de chaque type d'objet stellaire

## Evolution des étoiles peu massives

### Destin du coeur CO

#### Cadavre stellaire

L'étoile géant rouge évoluée a laissé la place à une nébuleuse planétaire dont le centre est occupé par un cœur carbone-oxygène:

- de rayon =  $0.01 R_{\odot}$  : très **petit rayon**
- de température élevée : **apparence blanche ou bleutée**

#### ➤ naine blanche

Relation **luminosité-température** paramétrée par le **rayon**:

Loi de Stefan :  $L = 4\pi R^2 \sigma T^4 \Rightarrow \log L = 4 \log T + 2 \log R + \text{cste}$

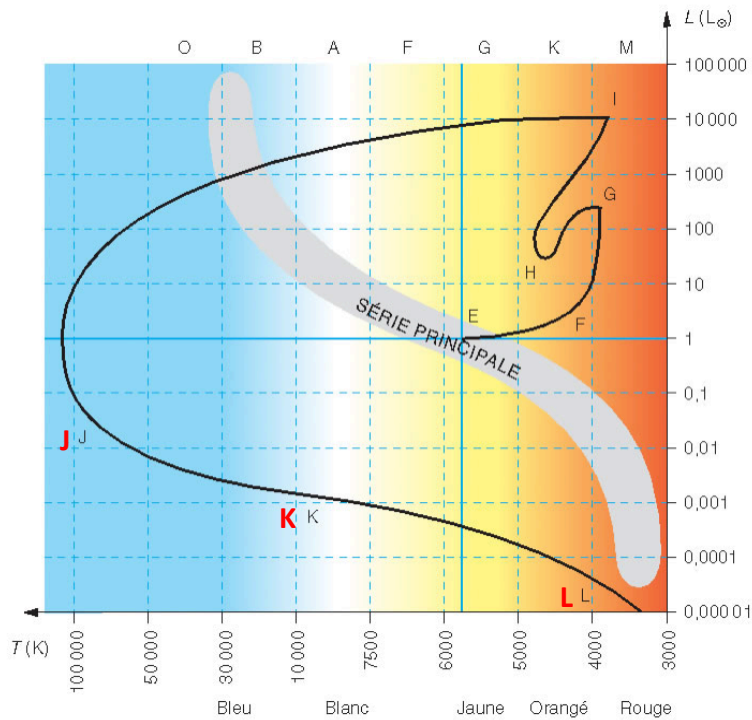
- la séquence des naines blanches est **parallèle** à la séquence principale (et à la séquence des géantes  $R = 100 R_{\odot}$ ) dans un diagramme  $\log L = f(\log T)$

Lent refroidissement, depuis  $T_{\text{surface}} \sim 10^5$  K jusque 0 K, en quelques  $10^{11}$  ans

#### ➤ naine noire (pas d'émission thermique)

# Evolution dans le diagramme H-R

## Etoile de masse solaire: naine blanche



J, K, L : naine blanche = cœur de CO de l'étoile géante rouge asymptotique

âge: de 11.801 milliards d'années à 100 milliards d'années

cœur carbone-oxygène sans réaction nucléaire, se refroidissant très lentement

# Naine blanche et nébuleuse planétaire

## IC 5148, distance 3000 AL



# Naine blanche et nébuleuse planétaire

NGC 6781, distance 1000s AL



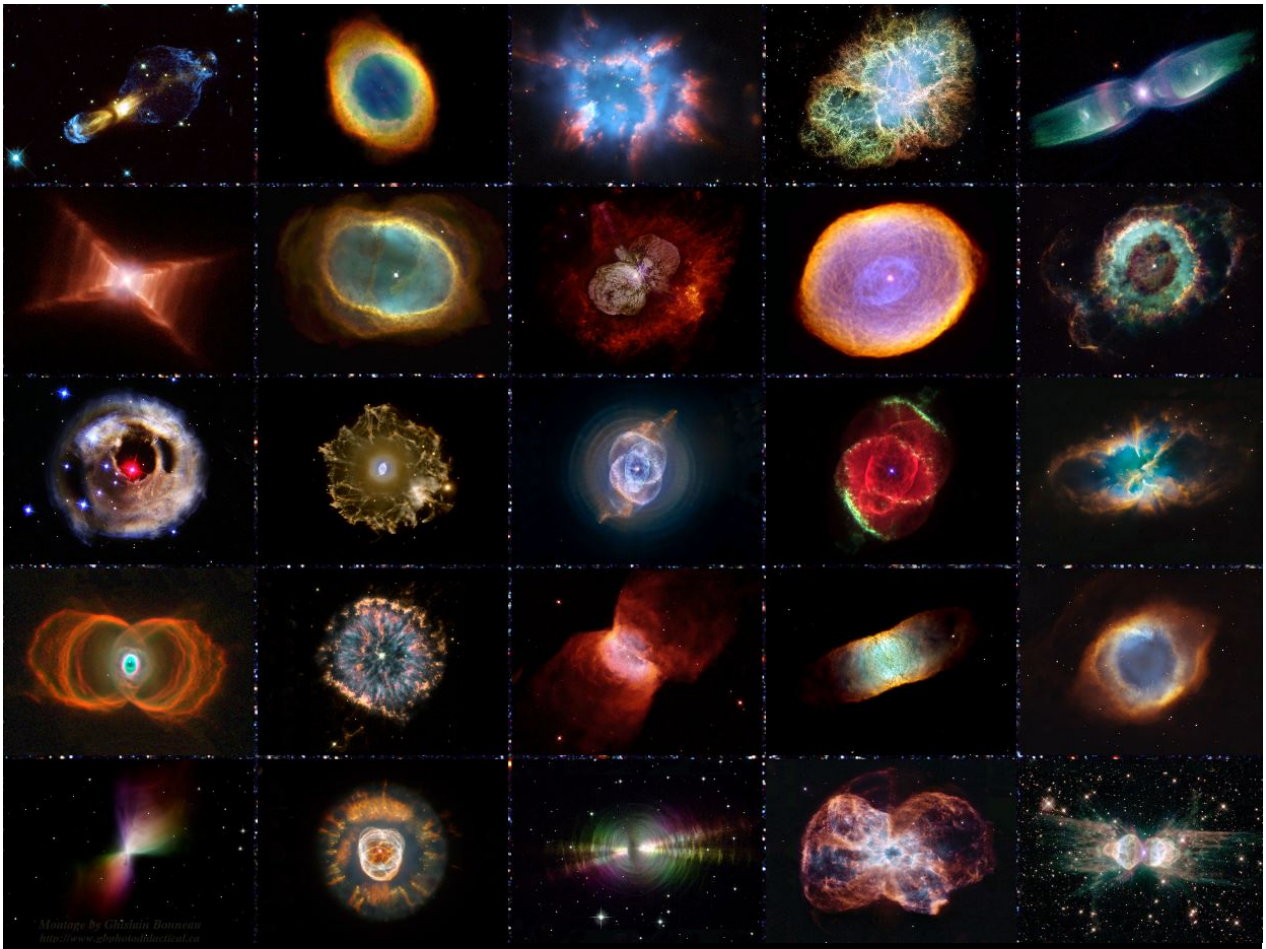
ESO, 3.6m

# Naine blanche et nébuleuse planétaire

Cat's Eye Nebula (NGC 6543)



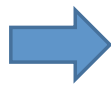
Hubble ST



La Structure de l'Univers

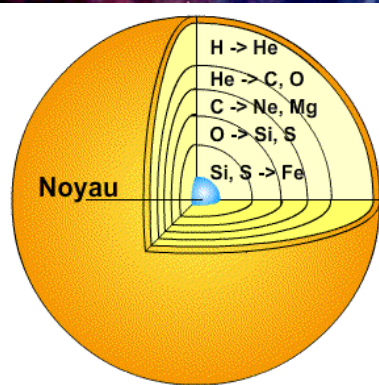
# Evolution des étoiles

Destin selon la masse



$M < 8 M_{\odot}$

# Etoile massive



**Etoile de  $25 M_{\text{soleil}}$**  : la progression de température au cœur induite par la contraction gravitationnelle efficace (masse importante!) permet de **dépasser** tous les seuils des réactions nucléaires successives

➤ structure en « pelures d'oignon »

## Nucléosynthèse stellaire

*Evolution chimique des étoiles*

Production de nouveaux éléments

$4 \text{ } ^1\text{H} \Rightarrow \text{}^4\text{He}$	combustion H	$T > 10 \cdot 10^6 \text{ K}$ $T > 15 \cdot 10^6 \text{ K}$	cycle p-p cycle CNO
$3 \text{ } ^4\text{He} \Rightarrow \text{}^{12}\text{C}$ $\text{}^{12}\text{C} + \text{}^4\text{He} \Rightarrow \text{}^{16}\text{O}$	combustion He	$T > 100 \cdot 10^6 \text{ K}$	réaction $3\alpha$
$\text{}^{12}\text{C} + \text{}^{12}\text{C} \Rightarrow \text{}^{23}\text{Na} + \text{}^1\text{H}$ $\text{}^{12}\text{C} + \text{}^{12}\text{C} \Rightarrow \text{}^{20}\text{Ne} + \text{}^4\text{He}$	combustion C	$T > 600 \cdot 10^6 \text{ K}$	
$\text{}^{16}\text{O} + \text{}^{16}\text{O} \Rightarrow \text{}^{31}\text{P} + \text{}^1\text{H}$ $\text{}^{16}\text{O} + \text{}^{16}\text{O} \Rightarrow \text{}^{28}\text{Si} + \text{}^4\text{He}$ $\text{}^{16}\text{O} + \text{}^{16}\text{O} \Rightarrow \text{}^{31}\text{S} + \text{n}$ $\text{}^{16}\text{O} + \text{}^{16}\text{O} \Rightarrow \text{}^{32}\text{S}$	combustion O	$T > 1.5 \cdot 10^9 \text{ K}$	
$\text{}^{28}\text{Si} + \text{}^4\text{He} + \text{}^4\text{He} + \dots \Rightarrow \text{}^{56}\text{Fe}$	combustion Si	$T > 3 \cdot 10^9 \text{ K}$	

➤ peuplement du tableau de Mendeleïev



Une **enveloppe d'hydrogène** inactif (matériau de départ) entoure une partie centrale structurée en différentes **couches de combustion**:

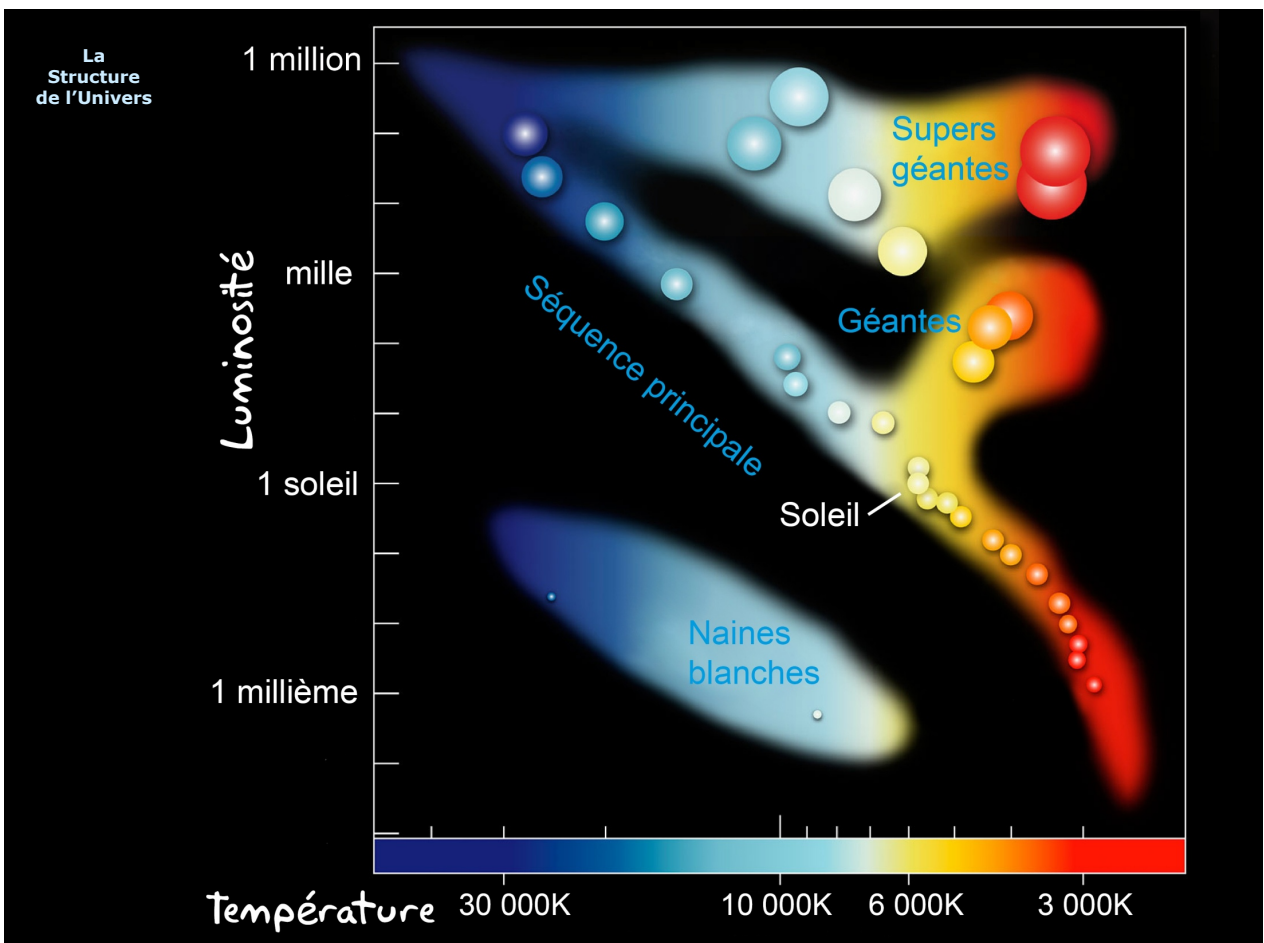
- combustion hydrogène en hélium
- combustion hélium en carbone
- fusion carbone
- fusion oxygène
- fusion silicium : un **noyau de fer** se constitue peu à peu

### Equilibre hydrodynamique

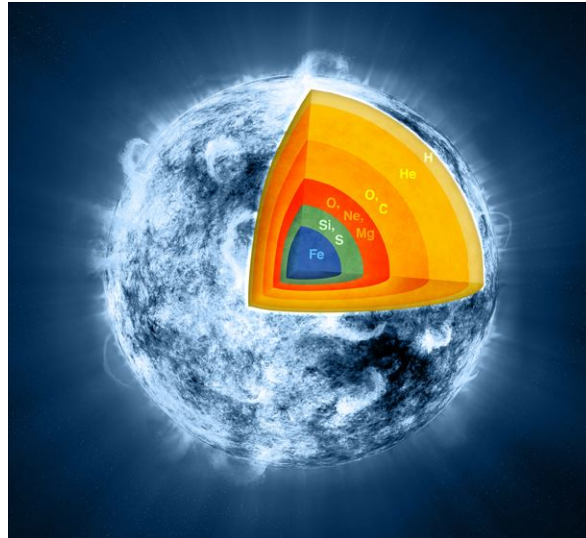
La production d'énergie très importante au cœur doit être **évacuée** efficacement

L'enveloppe répond en **augmentant son rayon** (et sa surface), donc en **diminuant sa température** de surface

➤ évolution de géante bleue à **supergéante rouge**



# Coeur de fer

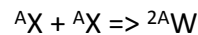


# Réaction nucléaire

*Réactions endothermique et exothermique*

Noyau-cible et noyau-fille

Soit l'énergie libérée par la fusion de **deux noyaux identiques**:



L'énergie de la réaction est:  $E = (m_x + m_x - m_w) c^2$

On fait apparaître le paramètre « **masse par nucléon** »  $M = m/A$  :

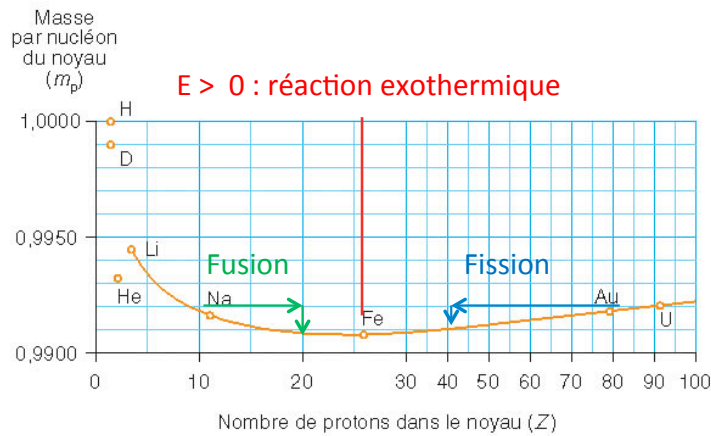
$$E = (A M_x + A M_x - 2A M_w) c^2 = 2A (M_x - M_w) c^2$$

L'énergie de la réaction est du **signe de la différence  $M_x - M_w$**  :

- si masse par nucléon noyau-cible (X) > noyau-fille (W) : énergie positive, réaction exothermique, elle produit de l'énergie
- si masse par nucléon noyau-cible (X) < noyau-fille (W) : énergie négative, réaction endothermique, elle nécessite de l'énergie pour se produire

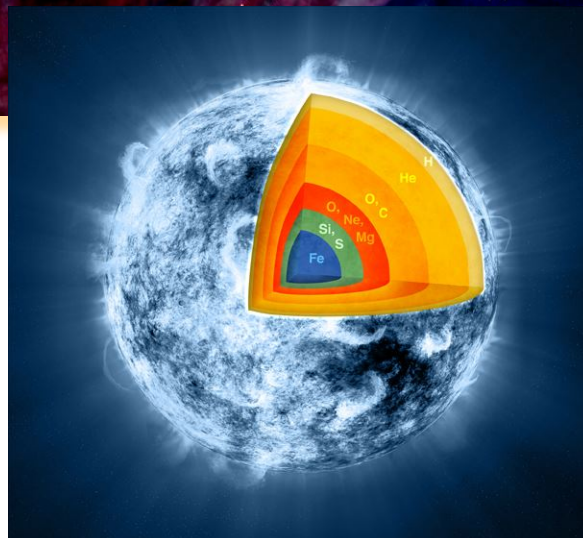


# Fusion et fission



**Réaction nucléaire exothermique:** en deçà du fer, les réaction de **fusion** produisent de l'énergie; au-delà du fer, les réactions de **fission** produisent de l'énergie

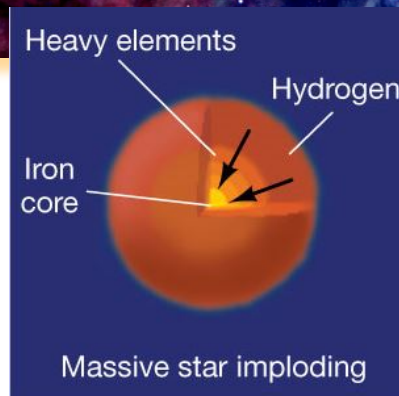
# Coeur de fer



**Limite du fer:** au-delà du noyau de fer, les réactions de fusion seraient endothermiques, il n'y a donc plus de réaction nucléaire

➤ **plus de production d'énergie possible !**

# Effondrement du coeur



**Absence de production d'énergie au cœur:** sans pression thermique qui contrebalance la pression gravifique, l'étoile **s'effondre** sur elle-même

➤ **collapse du cœur**

## Phase supergéante rouge

*Effondrement du coeur de fer*

Cœur de neutrons

Le cœur de fer est l'équivalent d'une « **naine blanche** » de fer

Mais la pression de dégénérescence (cf. cœur CO) n'est elle-même pas suffisante (si  $M > 8 M_{\odot}$ ) pour empêcher la poursuite de l'**effondrement** du cœur

La densité s'accroît tellement que les noyaux atomique se « **disloquent** »: plus de noyaux de fer, uniquement des protons, neutrons et électrons libres

La densité continue de s'accroître: les protons et électrons se combinent pour former des **neutrons** et des neutrinos



Les neutrinos s'échappent sans interagir avec la matière

➤ il reste un **cœur extrêmement dense de neutrons**



Pour une densité donnée, le **principe d'exclusion de Pauli** pour les fermions (i.e. particules de spin 1/2: électrons, neutrons, protons... obéissant à la statistique de Fermi-Dirac) va s'appliquer pour le cœur de neutrons

*Deux fermions dont les fonctions d'onde se superposent ne peuvent jamais avoir des valeurs identiques pour l'ensemble de leurs nombres quantiques.*

- (rappel) électrons autour d'un atome: règles de remplissage des **orbitales électroniques** (structure du tableau de Mendeleïev)
- (rappel) électrons dans cœur de CO (naine blanche): arrêt de la combustion nucléaire
- implication du principe de Pauli pour le **cœur de neutrons** : ???



Dans un gaz à température ambiante, une distance de l'ordre de 3 nm sépare les molécules, tandis que les longueurs d'onde de De Broglie associées (aspect « onde » de la particule) sont de l'ordre de 0.03 nm : **pas de manifestation quantique**

**longueur d'onde de De Broglie:**  $\lambda = h / p = h / mv$

Par contre, si on augmente la densité par un facteur  $100^3 = 10^6$ , la distance moyenne entre particules est de l'ordre de la longueur d'onde de De Broglie : les **effets quantiques** se manifestent

- **principe d'exclusion de Pauli**

*On peut aussi diminuer la température (à densité constante) : v augmente, donc  $\lambda = h / mv$  diminue => apparition des effets quantiques*

- **matière dégénérée** (les effets quantiques dominant)



## Compactification de la matière fermionique

A ces densités ( $\sim 10^6 \text{ g cm}^{-3}$ ), les fermions doivent peupler des niveaux d'énergie élevés (pour ne pas posséder de nombres quantiques identiques)

Les fermions possèdent alors de grandes vitesses (obligation d'être dans des états non encore occupés)

Les fermions génèrent une pression importante (cf. théorie cinétique des gaz: grandes vitesses = grande pression)

### ➤ pression de dégénérescence

Dans le cas du cœur de **neutrons**, on atteint ainsi la **limite de compactification** de la matière fermionique



Pour une densité donnée, le **principe d'exclusion de Pauli** pour les fermions (i.e. particules de spin 1/2: électrons, neutrons, protons...) va s'appliquer pour le cœur de neutrons

*Deux fermions dont les fonctions d'onde se superposent ne peuvent jamais avoir des valeurs identiques pour l'ensemble de leurs nombres quantiques.*

### ➤ cœur de neutrons : **limite de compactification** de la matière fermionique

## Phase supergéante rouge

### Limite d'effondrement du cœur de neutrons

#### Cœur incompressible

Pour une densité donnée, le **principe d'exclusion de Pauli** pour les fermions (i.e. particules de spin 1/2: électrons, neutrons, protons...) va s'appliquer pour le cœur de neutrons

*Deux fermions dont les fonctions d'onde se superposent ne peuvent jamais avoir des valeurs identiques pour l'ensemble de leurs nombres quantiques.*

- cœur de neutrons : **limite de compactification** de la matière fermionique

#### Rebond de l'enveloppe

L'enveloppe **rebondit** sur le cœur de neutrons incompressible formé au centre

## Rebond de l'enveloppe



**Cœur de neutrons incompressible:** l'enveloppe d'hydrogène, hélium, carbone, oxygène, ... vient « cogner » contre le cœur et rebondit

- une **onde de choc** se propage vers l'extérieur

## Phase supergéante rouge

### Limite d'effondrement du cœur de neutrons

#### Cœur incompressible

Pour une densité donnée, le **principe d'exclusion de Pauli** pour les fermions (i.e. particules de spin 1/2: électrons, neutrons, protons...) va s'appliquer pour le cœur de neutrons

*Deux fermions dont les fonctions d'onde se superposent ne peuvent jamais avoir des valeurs identiques pour l'ensemble de leurs nombres quantiques.*

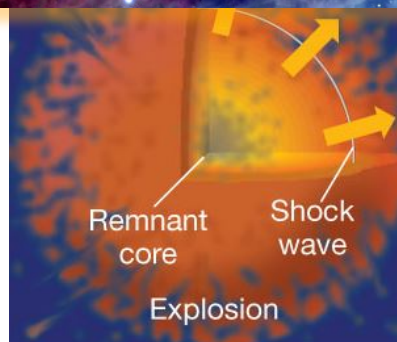
- cœur de neutrons : **limite de compactification** de la matière fermionique

#### Rebond de l'enveloppe

L'enveloppe **rebondit** sur le cœur de neutrons incompressible formé au centre

- une **onde de choc** éjecte l'enveloppe dans le milieu interstellaire

## Ejection de l'enveloppe



**Onde de choc se propageant:** toute l'enveloppe est éjectée violemment dans le milieu interstellaire

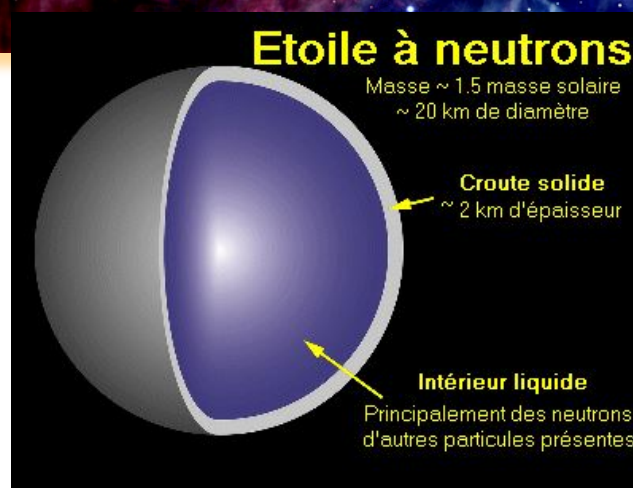
- explosion d'étoile: **supernova**

## Nébuleuse du Crabe

Rémanent de la supernova de 1054 (dans le Taureau)



## Résidu d'une supernova

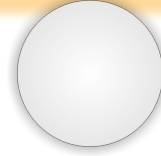


**Cœur de neutron mis à nu:** matière extrêmement dense : masse stellaire dans rayon de quelques km

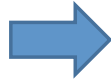
➤ étoile à neutron

## Evolution des étoiles

### Destin selon la masse



$M < 8 M_s$



$8 M_s < M < ? M_s$

## Phase supernova

### Puissance dégagée

#### Variation d'énergie potentielle

Soit une masse  $m$  (enveloppe) plongée dans un **champ de gravité** créé par une masse  $M$  (masse de l'étoile à neutron) tombant d'une « hauteur »  $R_G$  (rayon de la supergéante) à  $R_N$  (rayon de l'étoile à neutron)

L'**énergie potentielle** à une hauteur  $r$  est donnée de manière générale par:

$$U(r) = -\frac{GM}{r}m$$

La **variation** d'énergie potentielle est alors:

$$\Delta U = U(R_G) - U(R_N) = -\frac{GM}{R_G}m + \frac{GM}{R_N}m$$

On a typiquement:

$$M = 1.4 M_s$$

$$m = 10 M_s$$

$$R_G = 1 \text{ UA}$$

$$R_N = 6 \text{ km}$$

On voit que  $R_G \gg R_N$ : il reste uniquement le terme relatif à l'étoile à neutron



## Phase supernova

*Puissance dégagée*

Luminosité d'une supernova

Il reste donc pour la **variation d'énergie potentielle** :

$$\Delta U = -U(R_N) = \frac{GM}{R_N} m$$

Numériquement:  $\Delta U = 6 \cdot 10^{50} \text{ J !!}$

Si cette énergie est libérée en 1 jour:  $L_{\text{SN}} = \Delta U / (24 \times 3600) = 6.9 \cdot 10^{45} \text{ W}$

En luminosité solaire:  $L_{\text{SN}} (\text{visible}) \sim 10^9 L_{\text{s}}$

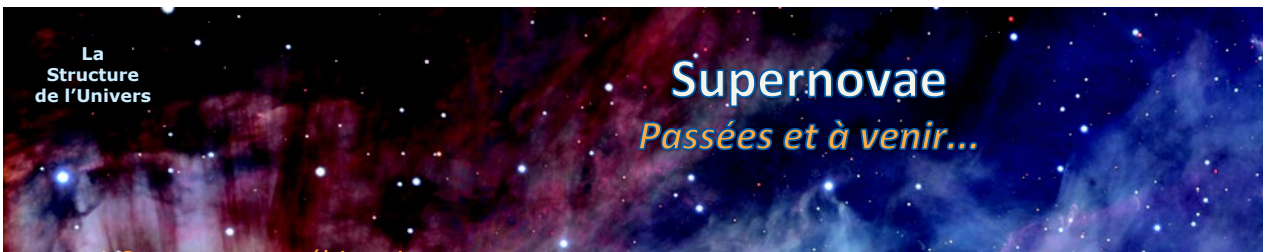
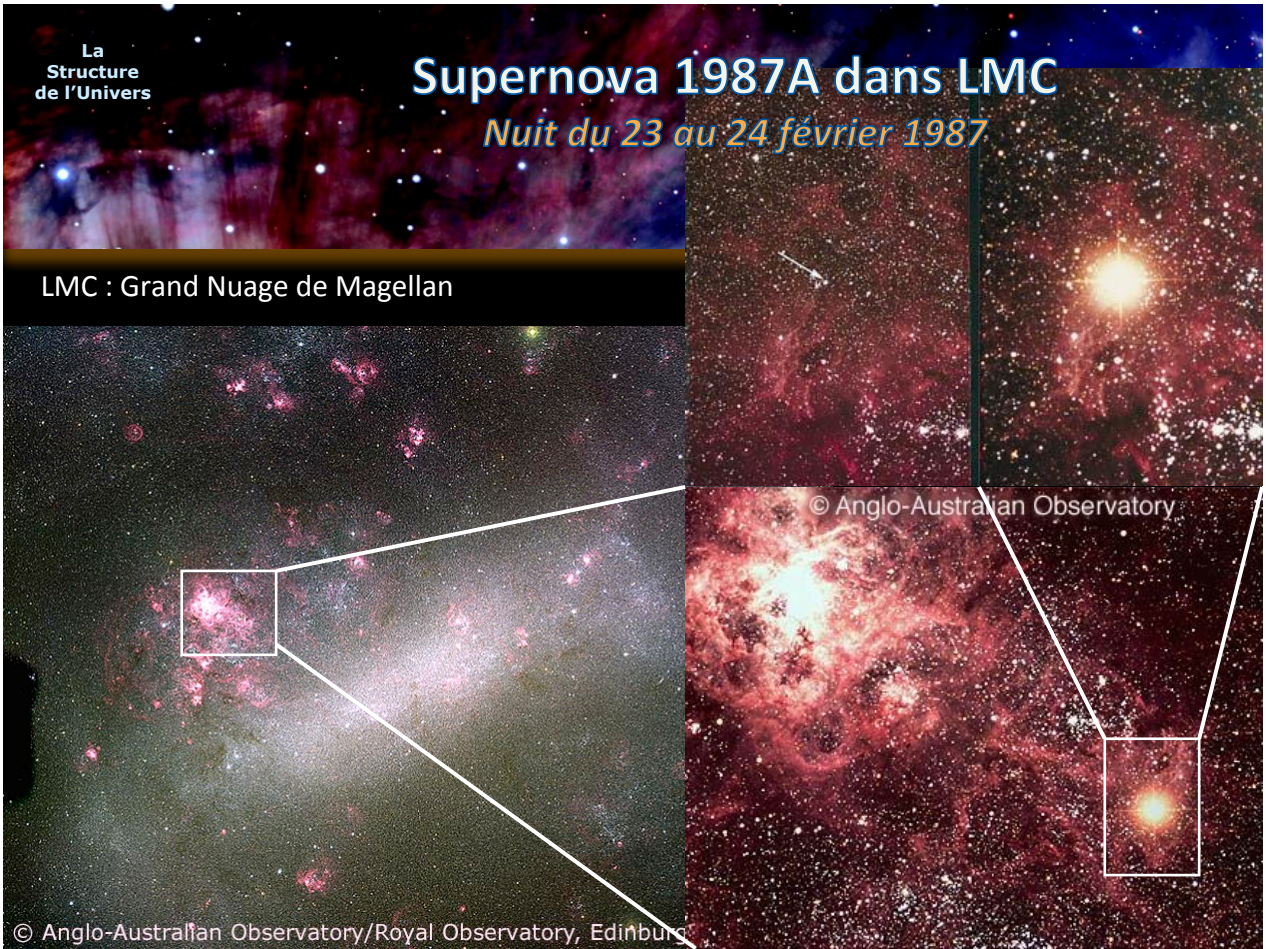
➤ soit l'équivalent de la luminosité d'une galaxie entière !

## Supernova 1991N dans NGC3310

*Images de 1987 et de 1991*



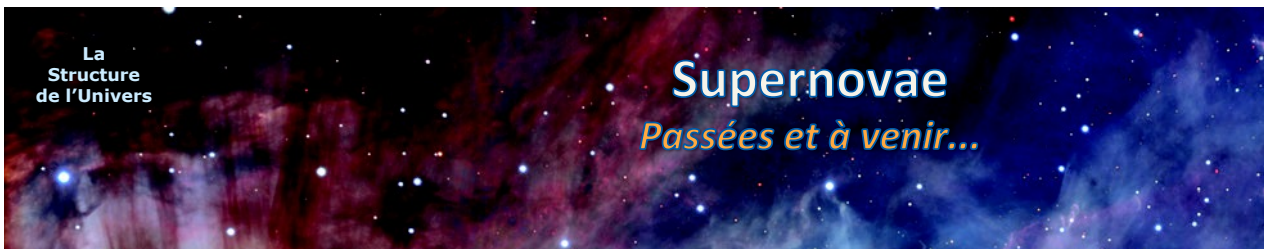
supernova aussi brillante que le noyau de la galaxie (milliards d'étoiles)



Supernovae préhistoriques

Voiles

-10.000 ans



### Supernovae préhistoriques

Voiles -10.000 ans

### Supernovae historiques

Centaure	185
Loup-centaure	1006
Taureau (nébuleuse du Crabe)	1054

# Supernovae historiques

*Taureau (1054)*



Nébuleuse du crabe

# Supernovae

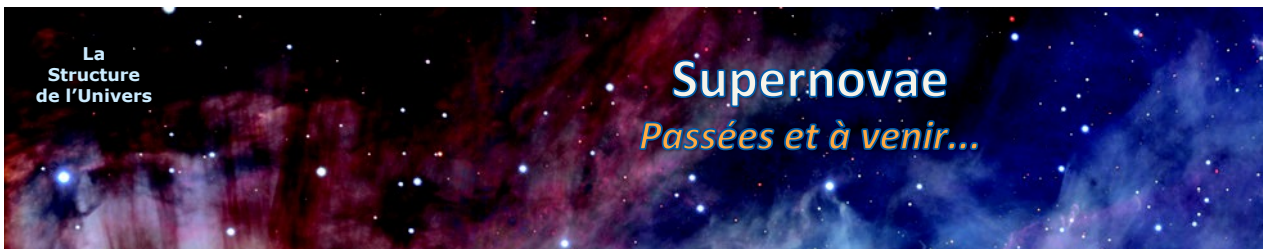
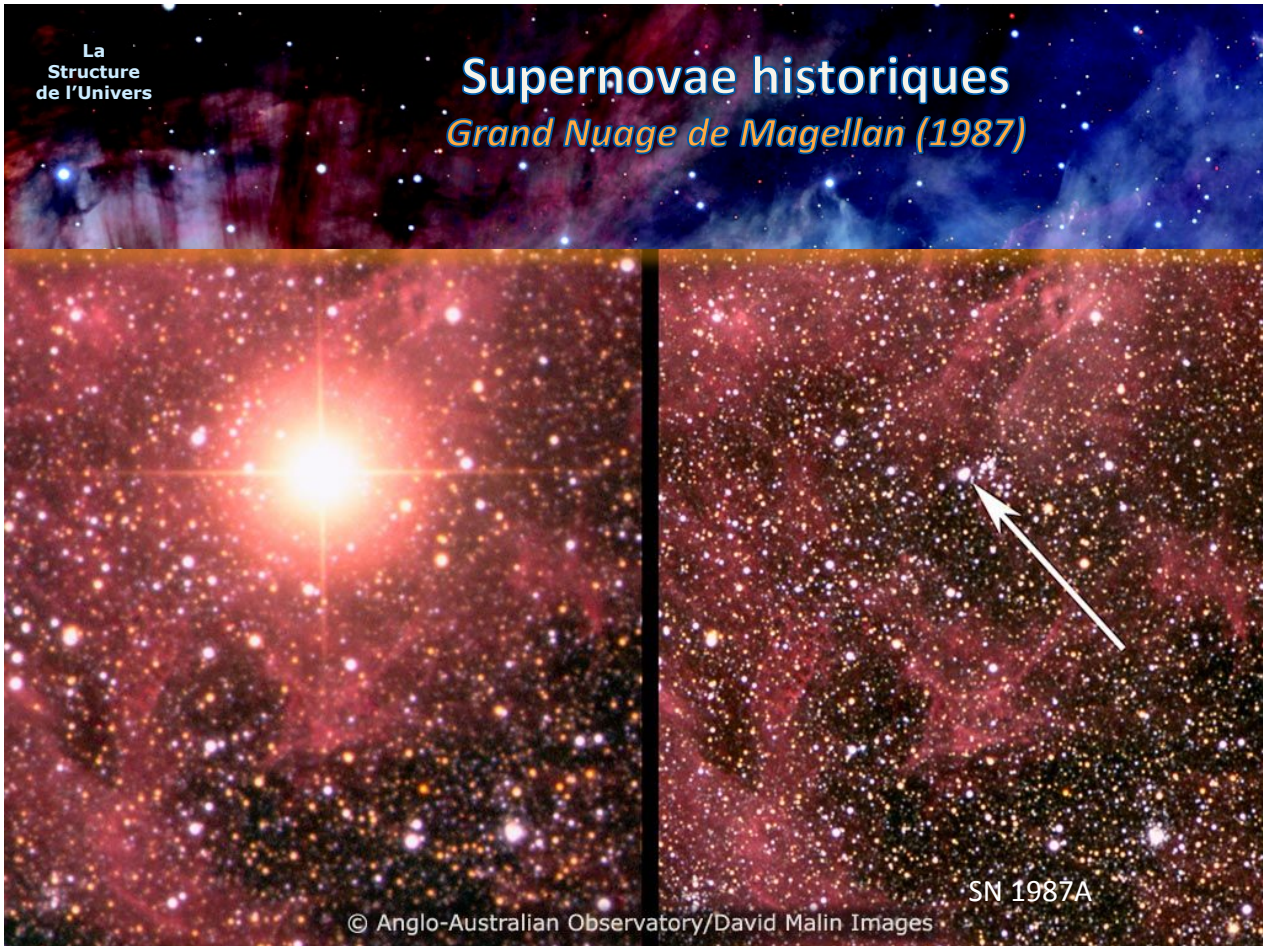
*Passées et à venir...*

## Supernovae préhistoriques

Voiles -10.000 ans

## Supernovae historiques

Centaure	185	
Loup-centaure	1006	
Taureau (nébuleuse du Crabe)	1054	
Cassiopée	1181	
Cassiopée (nova de Tycho)	1572	(immutabilité des astres?)
Ophiucus (étoile de Kepler)	1604	
LMC SN1987A	1987	



### Supernovae préhistoriques

Voiles -10.000 ans

### Supernovae historiques

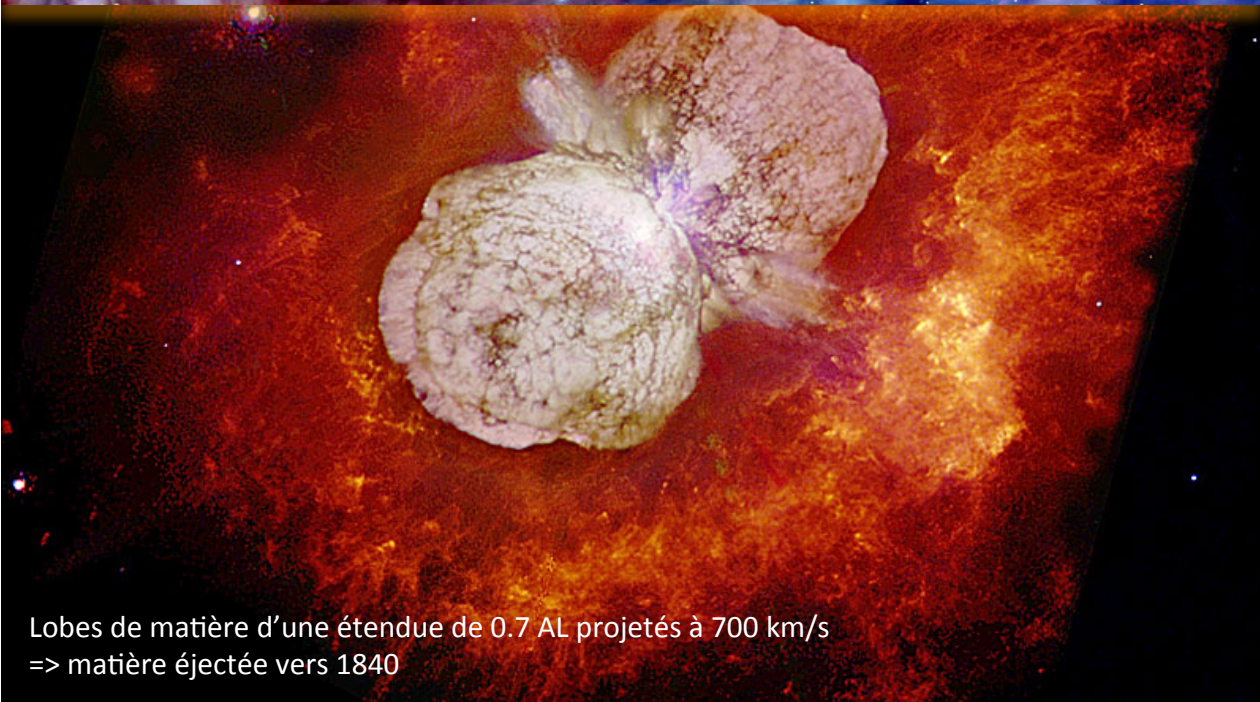
Centaure	185	
Loup-centaure	1006	
Taureau (nébuleuse du Crabe)	1054	
Cassiopée	1181	
Cassiopée (nova de Tycho)	1572	(immutabilité des astres?)
Ophiucus (étoile de Kepler)	1604	
LMC SN1987A	1987	

### Supernovae futures

Eta Carinea ?

# Supernovae futures?

*Eta Carinae (distance: 9000 AL)*

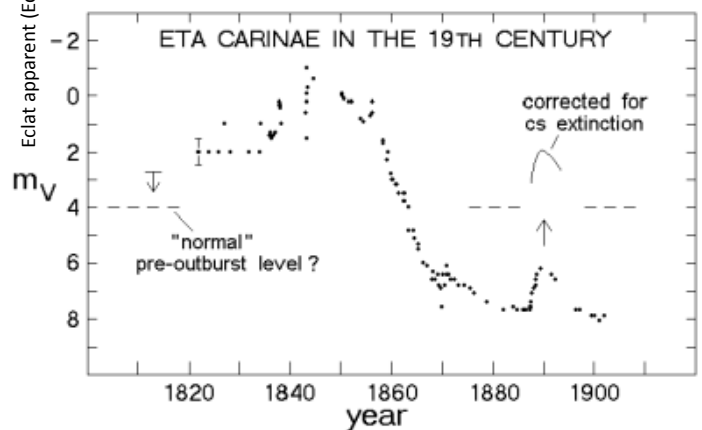
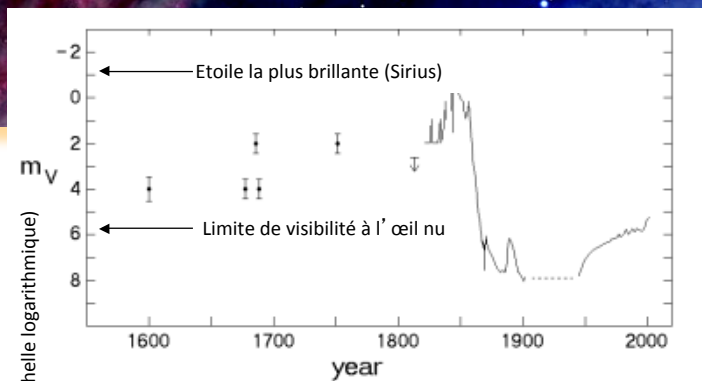


Lobes de matière d'une étendue de 0.7 AL projetés à 700 km/s  
=> matière éjectée vers 1840

## Eta Carinae

**Matière éjectée en 1840:**  
précisément, à cette époque,  
fut observé un sursaut d'éclat  
de eta Car...

➤ analogie avec le cas de SN  
1987A



## Supernovae futures?

*Eta Carinae : comparaison avec SN 1987A*



SN 1987A observée 7 ans après l'explosion: la matière éjectée lors de l'explosion est confinée au point central. Les anneaux sont liés à de la matière éjectée par la supergéante avant l'explosion, comme pour eta Carinae en 1840!

## Supernovae

*Passées et à venir...*

### Supernovae préhistoriques

Voiles -10.000 ans

### Supernovae historiques

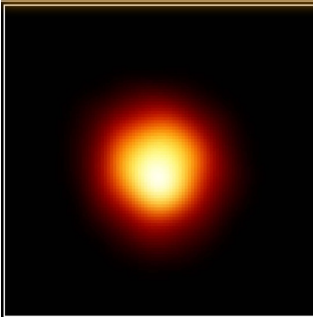
Centaure	185	
Loup-centaure	1006	
Taureau (nébuleuse du Crabe)	1054	
Cassiopée	1181	
Cassiopée (nova de Tycho)	1572	(immutabilité des astres?)
Ophiucus (étoile de Kepler)	1604	
LMC SN1987A	1987	

### Supernovae futures

Eta Carinae ?      Bételgeuse ?

# Supernovae futures?

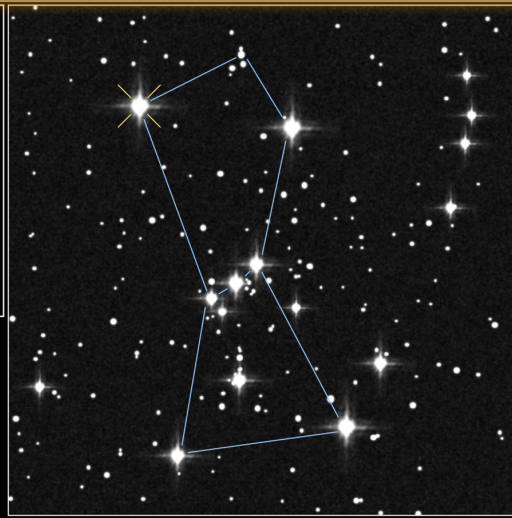
## Bételgeuse



Size of Star

Size of Earth's Orbit

Size of Jupiter's Orbit



Supergéante rouge de la constellation d'Orion:

$$L = 10^4 L_{\odot}$$

$$R = 600 R_{\odot} = 3 \text{ UA} !$$

### Atmosphere of Betelgeuse · Alpha Orionis

Hubble Space Telescope · Faint Object Camera

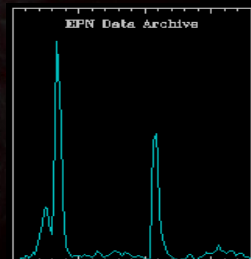
PRC96-04 · ST ScI OPO · January 15, 1996 · A. Dupree (CIA), NASA, ESA

# Nébuleuse du Crabe (SN de 1054)

## Présence d'une émission radio régulière



Période de 33.2 ms







Résidu de SN 1054 et consorts: objets stellaires produisant un signal radio périodique de 1 ms à quelques dizaines de secondes = **pulsar**

Premier représentant découvert en 1967 par **Jocelyn Bell** (étudiante de A. Hewish) : courtes impulsions de rayonnement , se répétant très régulièrement toutes les 1.34 secondes (*nom de travail: LGM-1 pour Little Green Men...*)

**Prix Nobel** en 1974 pour A. Hewish!



Relation dimension – périodicité de variation lumineuse

Soit un nuage lumineux de taille  $L$  : un photon émis à l'avant (sur la ligne de visée) nous parviendra un temps  $t = L/c$  plus tôt qu'un photon émis à l'arrière

Si le nuage double **subitement** de luminosité, l'observateur sur Terre ne verra qu'une augmentation **progressive** de luminosité prenant un temps  $\Delta t = L/c$

D'autre part, aucun phénomène physique ne peut survenir **simultanément** en tous les points d'un objet : le temps de propagation est au minimum égal à  $t \sim L/c$

➤ Toute variation de lumière de période  $T$  est nécessairement supérieure à la **grandeur temporelle caractéristique  $L/c$**

➤ La taille maximale possible d'une source de lumière variable de période  $T$  est:

$$L_{\max} = c T$$

# Nature des pulsars

## Taille maximale d'un pulsar milliseconde

### Cas d'un pulsar milliseconde

Pour  $T = 10^{-3}$  s, il vient  $L_{\max} = 300$  km : soit un objet de rayon  $R_{\max} = 150$  km

Densité de la matière si 1 masse solaire ( $1 M_{\odot} = 1.989 \cdot 10^{30}$  kg) concentrée dans sphère de rayon  $R_{\max} = 150$  km ?

$$\bullet R_{\max} = [1 M_{\odot} / (4/3 \rho_{\min})]^{1/3} = 150 \text{ km} \Rightarrow \rho_{\min} \sim 10^{11} \text{ g.cm}^{-3}$$

Densité nucléaire caractéristique (cf. Cours 1):

$$\bullet \rho = (A u m_a) / R_0^3 = 1.66 \cdot 10^{18} \text{ kg.m}^{-3} = 1.66 \cdot 10^{15} \text{ g.cm}^{-3}$$

On a donc: pulsar milliseconde = objet stellaire de densité  $\sim$  nucléaire

➤ **Les pulsars sont des étoiles à neutrons**

(cf. Cours 1 :  $R_{*} = 6.6$  km pour  $1 M_{\odot}$  + densité nucléaire)

# Pulsar

## Pulsing radio star

### Nouvelle classe d'objets

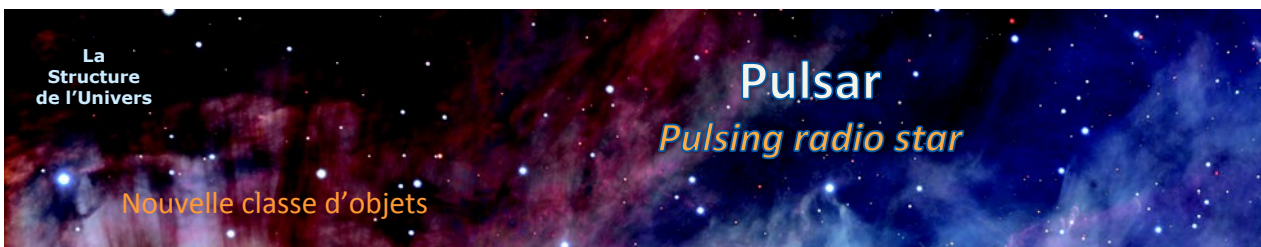
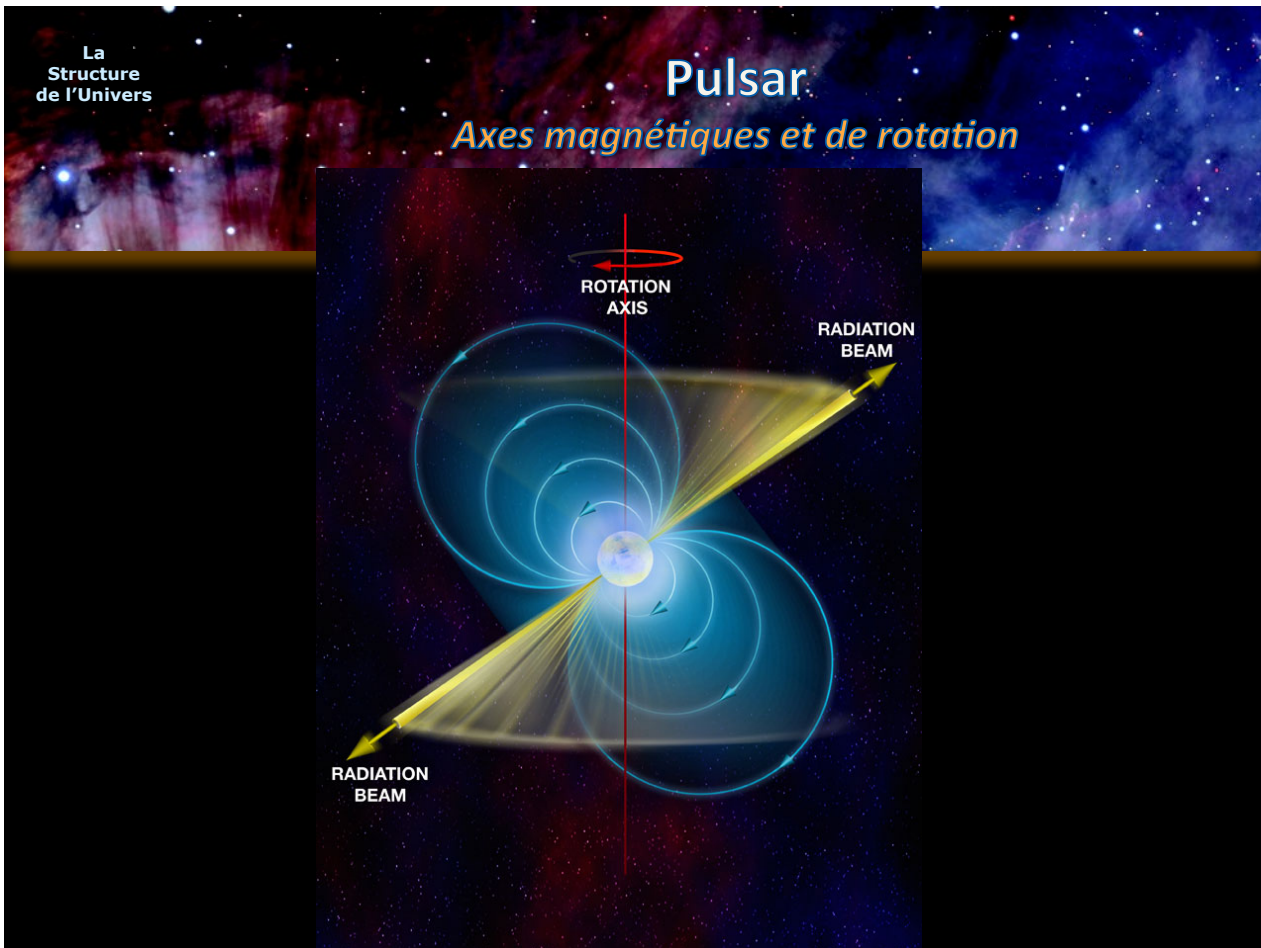
Résidu de SN 1054 et consorts: objets stellaires produisant un signal radio périodique de 1 ms à quelques dizaines de secondes = **pulsar**

Premier représentant découvert en 1967 par **Jocelyn Bell** (étudiante de A. Hewish) : courtes impulsions de rayonnement, se répétant très régulièrement toutes les 1.34 secondes (*nom de travail: LGM-1 pour Little Green Men...*)

➤ **étoile compacte en rotation très rapide (phare) : étoile à neutron**

### Origine de la lumière pulsée

**Axe magnétique**  $\neq$  axe de rotation (idem pour la Terre!)



Résidu de SN 1054 et consorts: objets stellaires produisant un signal radio périodique de 1 ms à quelques dizaines de secondes = **pulsar**

Premier représentant découvert en 1967 par **Jocelyn Bell** (étudiante de A. Hewish) : courtes impulsions de rayonnement, se répétant très régulièrement toutes les 1.34 secondes (*nom de travail: LGM-1 pour Little Green Men...*)

➤ étoile compacte en rotation très rapide (phare) : **étoile à neutron**

Origine de la lumière pulsée

**Axe magnétique** ≠ axe de rotation (idem pour la Terre!)

**Faisceau de lumière** directionnel émis par les particules tombant sur les pôles magnétiques (« rayonnement synchrotron »)

➤ **flash** lorsque la Terre est balayée par ce faisceau de lumière

# Pulsar

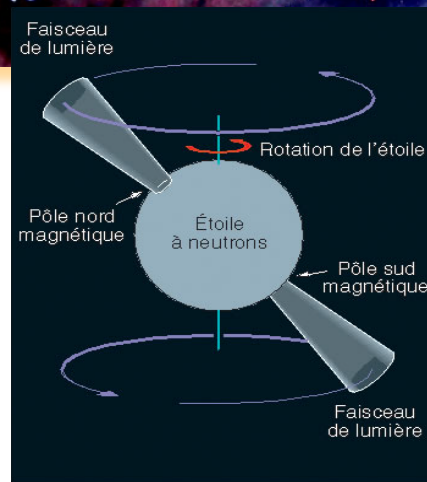
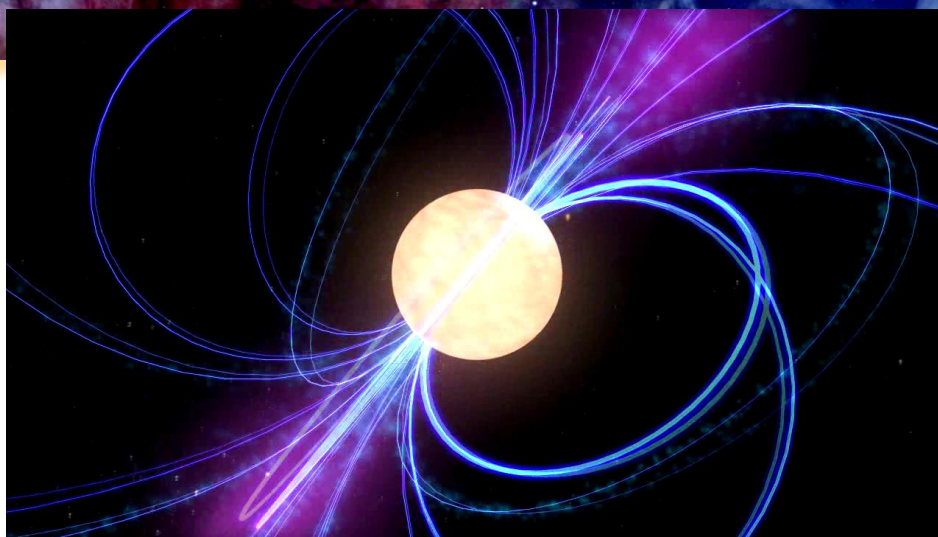


Figure 7.29

**Terre balayée par faisceau:** étoile à neutron vue comme un pulsar. Nécessite une configuration axe magnétique-Terre particulière

- toutes les étoiles à neutrons ne sont pas des pulsars

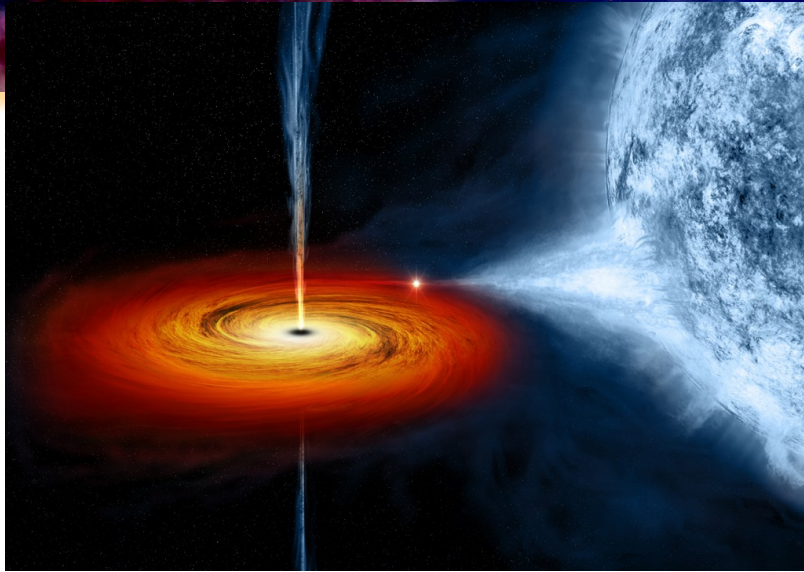
# Durée de vie d'un pulsar



**Perte d'énergie due à l'émission de lumière:** ralentissement de la vitesse de rotation et diminution de l'intensité du champ magnétique

- durée de vie pulsar :  $\sim 10^7$  ans

# Pulsar milliseconde



**Pulsar « éteint » dans système double:** transfert de masse via disque d'accrétion, provoquant une réactivation et une accélération de la vitesse de rotation

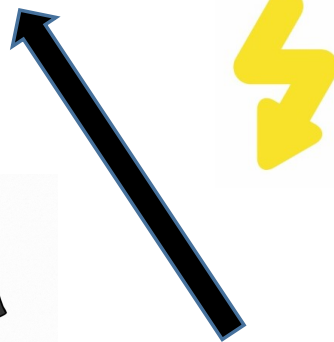
➤ **période de rotation : 1 à 10 ms !**

# Evolution des étoiles

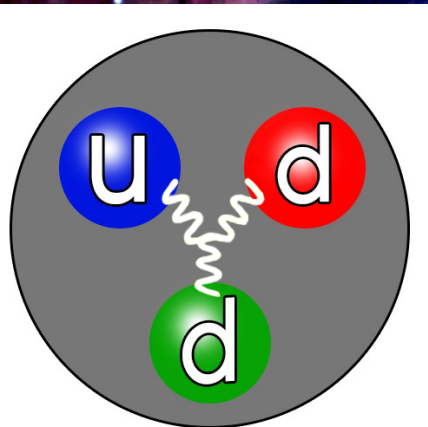
## Récapitulatif



Naine blanche



Etoile à neutrons



quark *up* : charge  $+2/3$   
 quark *down* : charge  $-1/3$

proton =  $u+u+d$   
 neutron =  $u+d+d$

Etoile de masse  $> 25-30 M_{\text{soleil}}$  : destin sous forme de supernova (hypernova), mais la **compression du cœur** peut se poursuivre au-delà de la densité de la matière nucléaire

- les neutrons sont brisés et transformés en soupe de quarks!



A partir d'une certaine masse, plus aucune force connue ne permet de contrebalancer la compression du cœur : situation de **singularité gravitationnelle**

Description exacte nécessiterait une théorie de la **gravitation quantique**

Une certitude: le rayon  $r$  d'un tel objet est **inférieur** au rayon d'une étoile à neutrons de même masse  $M$

➤ **rapport  $M/r^2$  extrêmement élevé**

Pourquoi considérer ce rapport? Car il donne l'intensité du **champ gravitationnel**  $g$  à la « surface » de l'objet:

$$g_{surface} = \frac{GM}{r^2}$$



Soit un objet de masse  $M$  concentré dans une sphère de rayon  $r$ . Soit un corps de masse  $m$  situé à une distance  $R_H > r$ , lancé à une vitesse  $v$  vers l'extérieur.

A une distance  $R$ , l'**énergie potentielle** de cette masse  $m$  plongée dans le champ gravitationnel  $g(R) = -GM/R^2$  créé par  $M$  est donnée par:

$$U(R) = -\frac{GM}{R} m$$

La **variation** d'énergie potentielle  $\Delta U$  de la masse  $m$  se déplaçant de  $R_H$  vers l'infini est égale à:

$$\Delta U = U(R_H) - U(\infty) = -\frac{GM}{R_H} m + 0m$$

# Champ gravitationnel d'un objet céleste

## Vitesse de libération

### Conservation de l'énergie dans un champ gravitationnel

Cette énergie potentielle doit être communiquée sous forme d'**énergie cinétique** à la masse  $m$ , au lancement (elle arrivera ainsi à vitesse nulle à l'infini):

$$\Delta E = E(R_H) - E(\infty) = \frac{mv^2}{2} + 0$$

En imposant  $\Delta U = -\Delta E$ :

$$-\frac{GM}{R_H} m = -\frac{mv^2}{2}$$

on obtient la **vitesse de libération** :

$$v_{lib} = \sqrt{\frac{2GM}{R_H}}$$

## Vitesse de libération



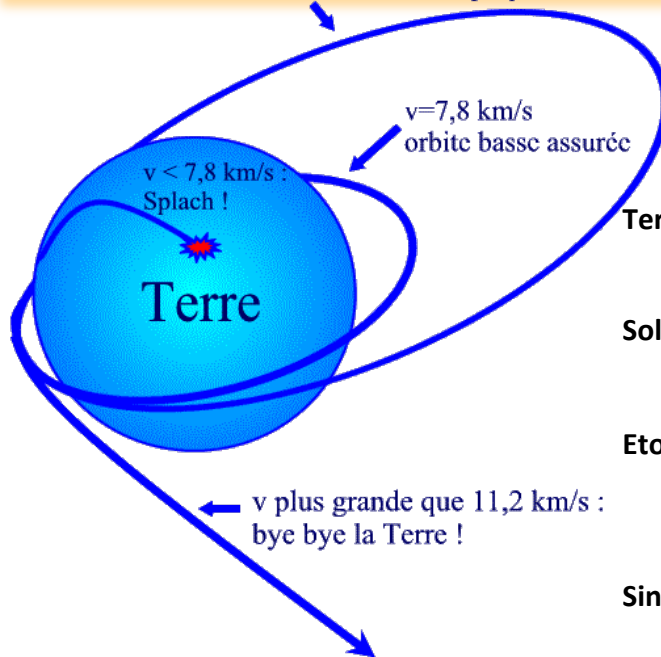
**Vitesse d'évasion**: vitesse minimale que doit atteindre un corps pour échapper définitivement à l'attraction gravitationnelle d'un objet céleste

- vitesse d'autant plus importante que la masse est importante et que le corps est proche du centre



## Vitesse de libération Selon compacité de l'objet céleste

v comprise entre 7,8 km/s et 11,2 km/s : c'est l'orbite elliptique



**Terre**     $M = 5.98 \cdot 10^{24} \text{ kg}$      $R_H = 6370 \text{ km}$   
 $v_{lib} = 11.2 \text{ km/s}$

**Soleil**     $M = 1.99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$      $R_H = 7 \cdot 10^5 \text{ km}$   
 $v_{lib} = 616 \text{ km/s}$

**Etoile à neutrons**  
 $M = 2.8 \cdot 10^{30} \text{ kg}$      $R_H = 7 \text{ km}$   
 $v_{lib} = 230\,000 \text{ km/s}$

**Singularité**  
 $M = 2.8 \cdot 10^{30} \text{ kg}$      $R_H = 4 \text{ km}$   
 $v_{lib} = 300\,000 \text{ km/s} = c$

## Singularité gravitationnelle Horizon

Rayon de Schwarzschild

La vitesse d'évasion atteint la **vitesse de la lumière** pour:

$$v_{lib} = c = \sqrt{\frac{2GM}{R_H}} \qquad R_H (km) = 3M(M_{sol})$$

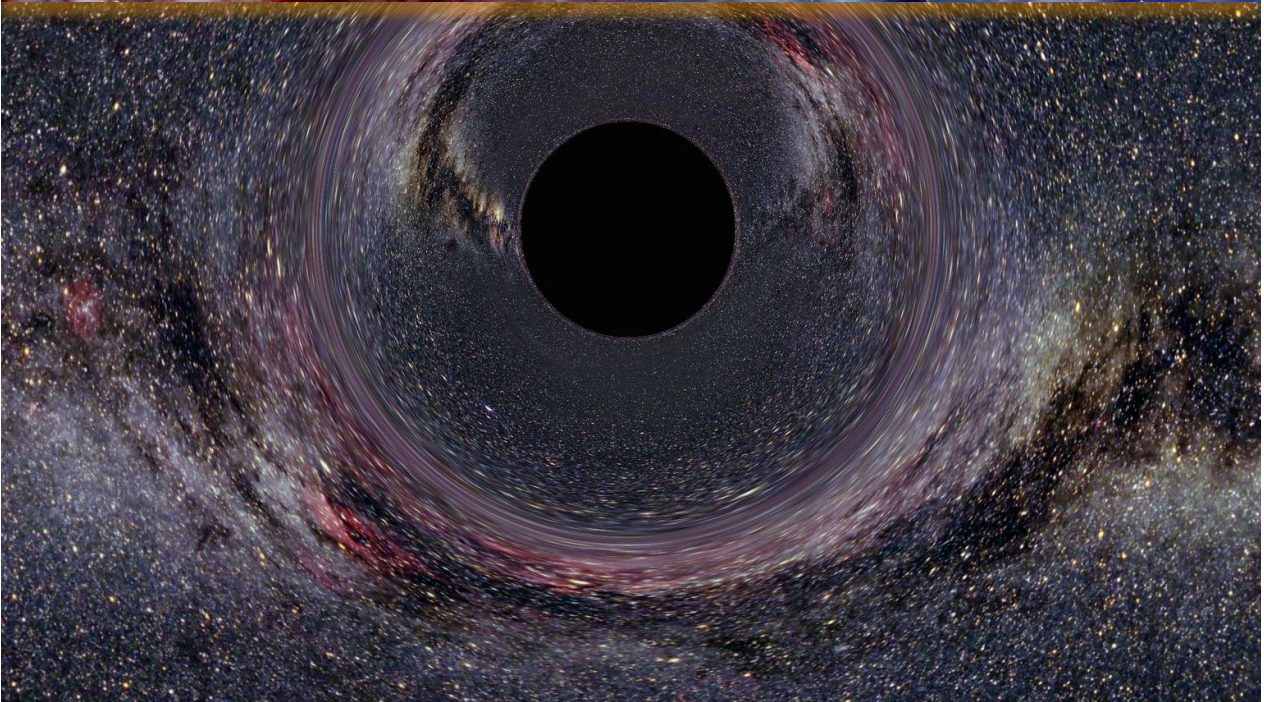
Il s'agit du **rayon de Schwarzschild**, également appelé **horizon des événements**

Puisque rien ne peut aller plus vite que  $c$ , rien ne peut s'échapper de l'horizon d'une singularité gravitationnelle, pas même la **lumière** !

➤ **trou noir**

# Trou noir stellaire

*Vue d'artiste*



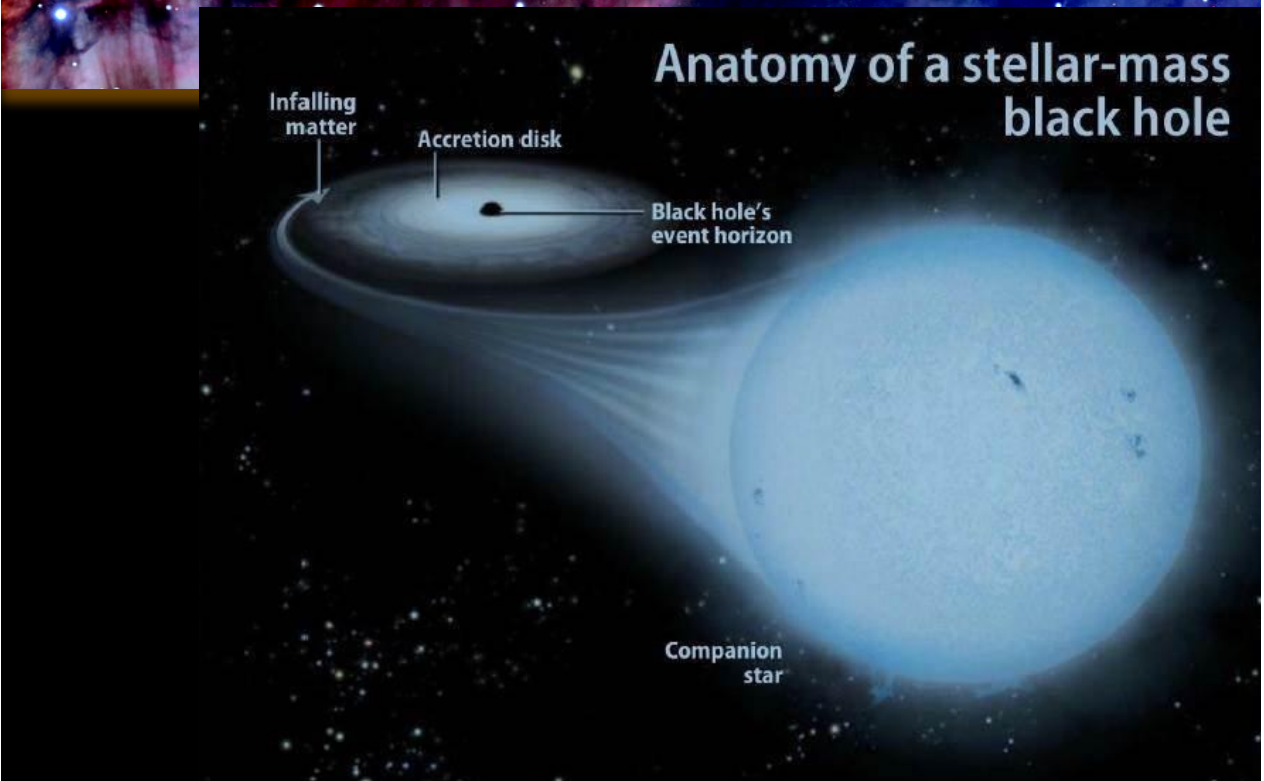
# Trou noir stellaire dans système double

*Possibilité de mise en évidence indirecte*

## Anatomy of a stellar-mass black hole

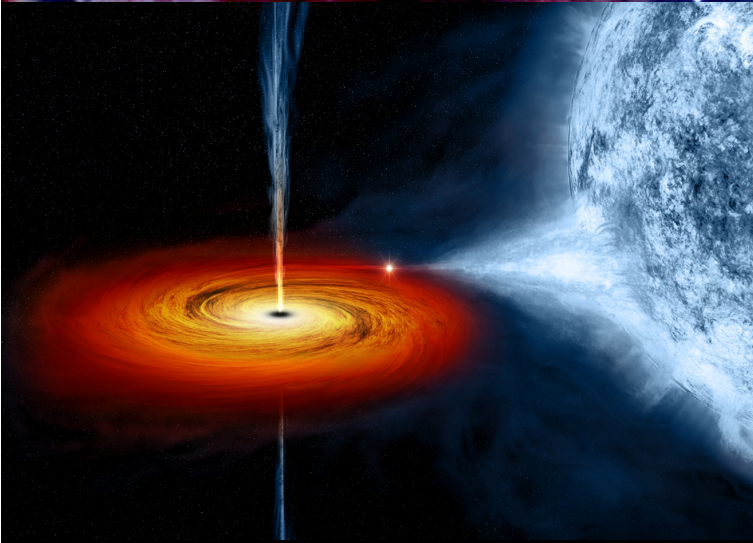
Infalling matter  
Accretion disk  
Black hole's event horizon

Companion star

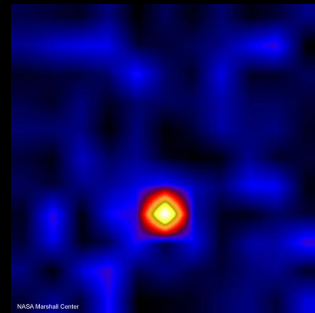
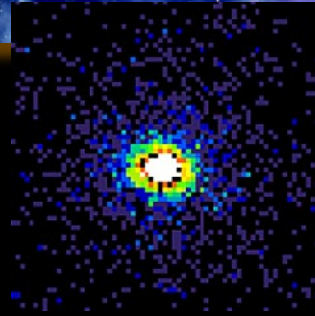


# Trou noir stellaire dans système double

Cygnus X-1



Vue d'artiste

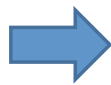


Observations en rayons X

On détecte l'étoile compagne et le rayonnement X généré par la matière spiralant autour du trou noir

# Evolution des étoiles

Destin selon la masse



$M < 8 M_s$



$8 M_s < M < 30 M_s$



$M > 30 M_s$

# EVOLUTION OF STARS

