

Fin de vie et mort des étoiles

François Mernier

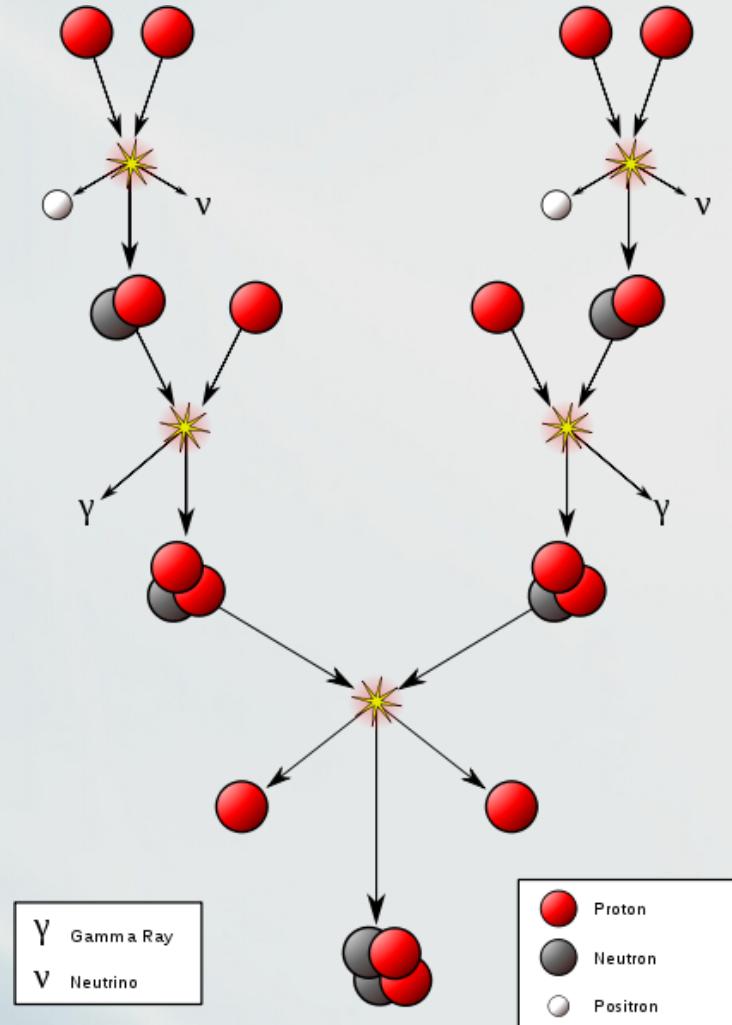
Août 2010 - Modave

Table des matières

- Quelques « rappels »...
- Fin de vie d'une étoile de faible masse
- Les naines blanches
- Fin de vie d'une étoile de masse importante
- Les étoiles doubles
- Les étoiles à neutron
- Les trous noirs

Quelques « rappels »...

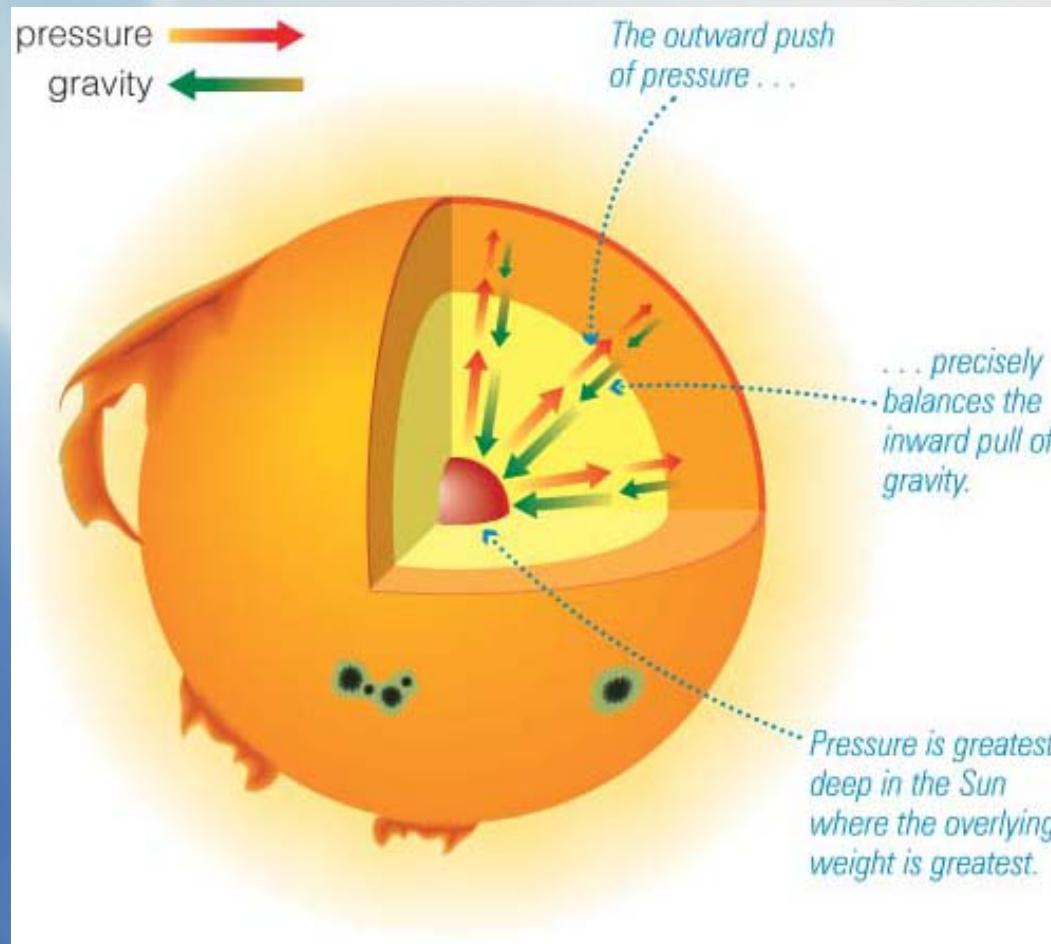
- La nucléosynthèse stellaire
 - Le « carburant » de l'étoile : l'hydrogène
 - Dans une étoile peu massive (Soleil) : chaîne proton-proton
 - 2 atomes d'hydrogène fusionnent, donnent 1 atome d'hélium + de l'énergie (lumière, chaleur)
 - Dans une étoile de masse importante : plus compliqué (cycle CNO)...



Crédit : Wikipedia

Quelques « rappels »...

- La nucléosynthèse stellaire
 - Equilibre entre **gravitation** et **pression interne**



Crédit :
LAPS
University of Colorado

Quelques « rappels »...

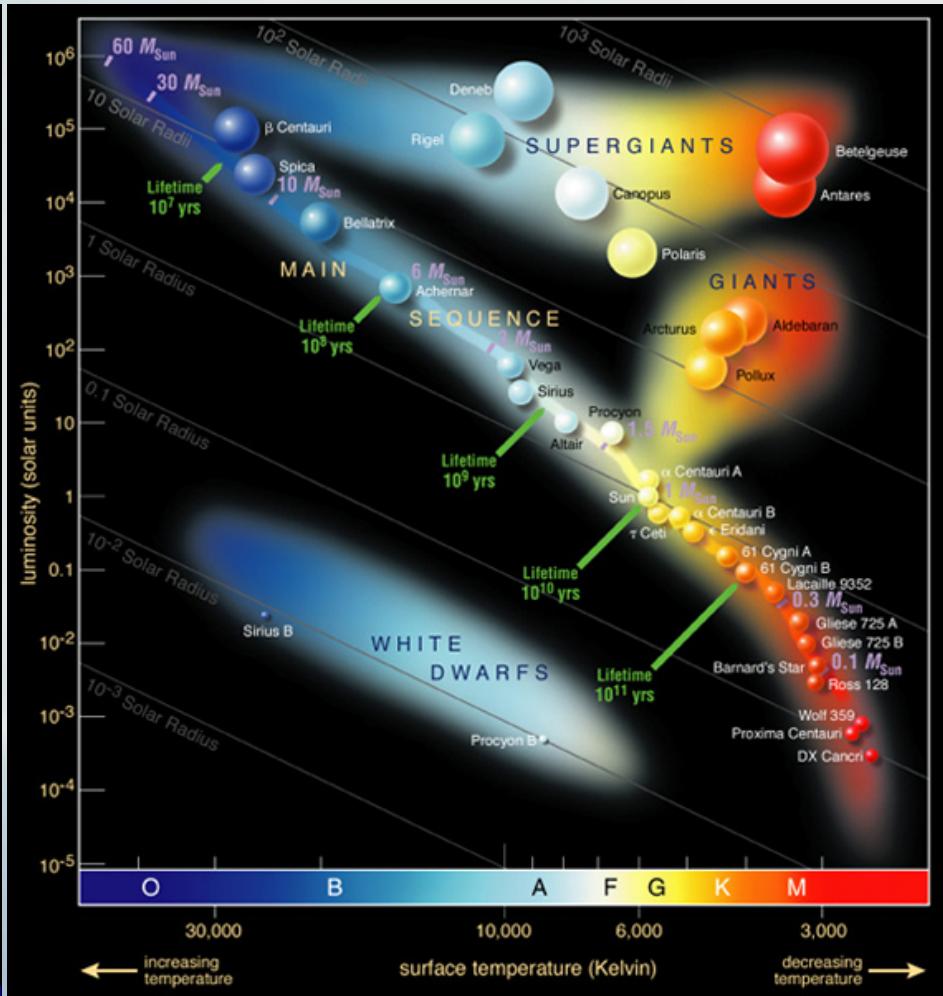
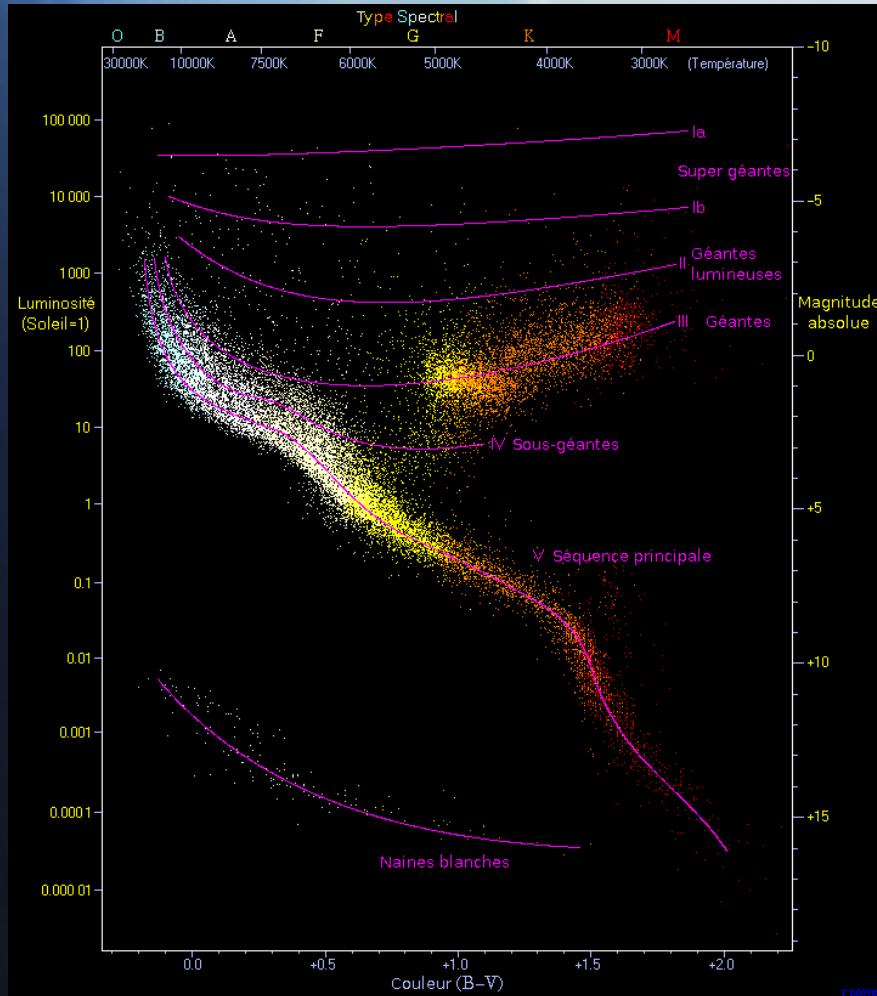
- Le diagramme Hertzprung-Russel (H-R)
 - Classement des étoiles en fonction de leur **température de surface** et de leur **luminosité externe**
 - Température de surface : lien avec la couleur de l'étoile (une étoile chaude apparaîtra bleue, une étoile froide apparaîtra rouge). Détermine également le type spectral de l'étoile (O, B, A, F, G, K, M) selon la position des raies sur son spectre.
 - Luminosité apparente : lien avec la taille de l'étoile. Elle est déterminée selon l'intensité des raies de son spectre

Quelques « rappels »...

- Le diagramme Hertzprung-Russel (H-R)
 - Les étoiles évoluent tout au long de leur vie et « voyagent » à travers le diagramme H-R.
 - Une étoile passe la plupart de son temps sur la séquence principale et y brûle tranquillement son hydrogène.
 - Nous allons voir quelles seront les étapes de la mort des étoiles sur ce diagramme.

Quelques « rappels »...

- Le diagramme Hertzsprung-Russel (H-R)



Crédit : Wikipédia

Fin de vie d'une étoile de faible masse

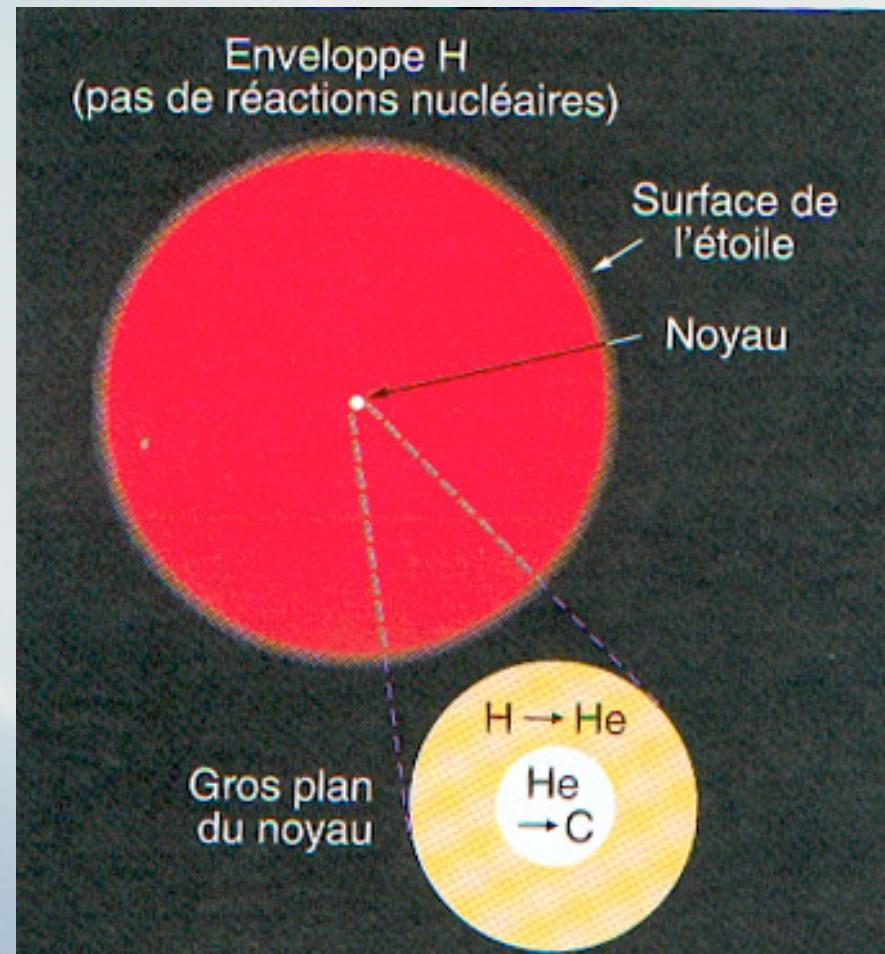
- Valable pour les étoiles de masse plus faible que 8 masses solaires
 - Exemple : le Soleil (1 masse solaire !)
- Plus sa masse est faible, plus elle brûlera lentement et vivra longtemps
 - Exemple : une étoile de 0,1 masse solaire vivra sur la série principale pendant 6 000 milliards d'années !
- L'étoile accumule son hélium (plus lourd) en son cœur.
 - Celui-ci ne peut pas fusionner (car la température de l'étoile est trop basse)
 - Il gêne la fusion de l'hydrogène au cœur.

Fin de vie d'une étoile de faible masse

- En s'accumulant, l'hélium entraîne une réaction en chaîne, chauffe l'étoile et accélère la fusion de l'hydrogène.
 - Points E à F : l'étoile gonfle mais sa luminosité n'augmente pas beaucoup. Sa température de surface diminue.
 - Points F à G : Grâce à la convection, le surplus d'énergie du cœur se répand dans toute l'étoile : sa luminosité augmente.
 - L'étoile est devenue une **géante rouge** !
- Flash de l'hélium
 - Le cœur d'hélium de l'étoile continue à se contracter, et chauffe à plus de 100 000 000 K => une grande partie de l'hélium peut soudain fusionner en carbone ! (en dégageant encore plus d'énergie)

Fin de vie d'une étoile de faible masse

- Point G à H : A cause du flash de l'hélium, les couches externes se retrouvent très loin de l'étoile et le noyau se dilate (donc refroidit).
- Point H : L'étoile retrouve un équilibre (structure en couches) : elle devient une **sous-géante**.



Fin de vie d'une étoile de faible masse

- Dernier acte
 - Point H à I : Même chose que la phase de géante, mais avec un cœur de carbone (et d'hélium) => beaucoup plus d'énergie ! L'étoile devient une **supergéante (rouge)**.
 - Point I à J : L'étoile est tellement diluée que la gravité ne la maintient presque plus. Les couches externes sont éjectées et l'étoile meurt en une **nébuleuse planétaire**.

Fin de vie d'une étoile de faible masse

- Quelques nébuleuses planétaires...
 - Nébuleuse de l'Hélice

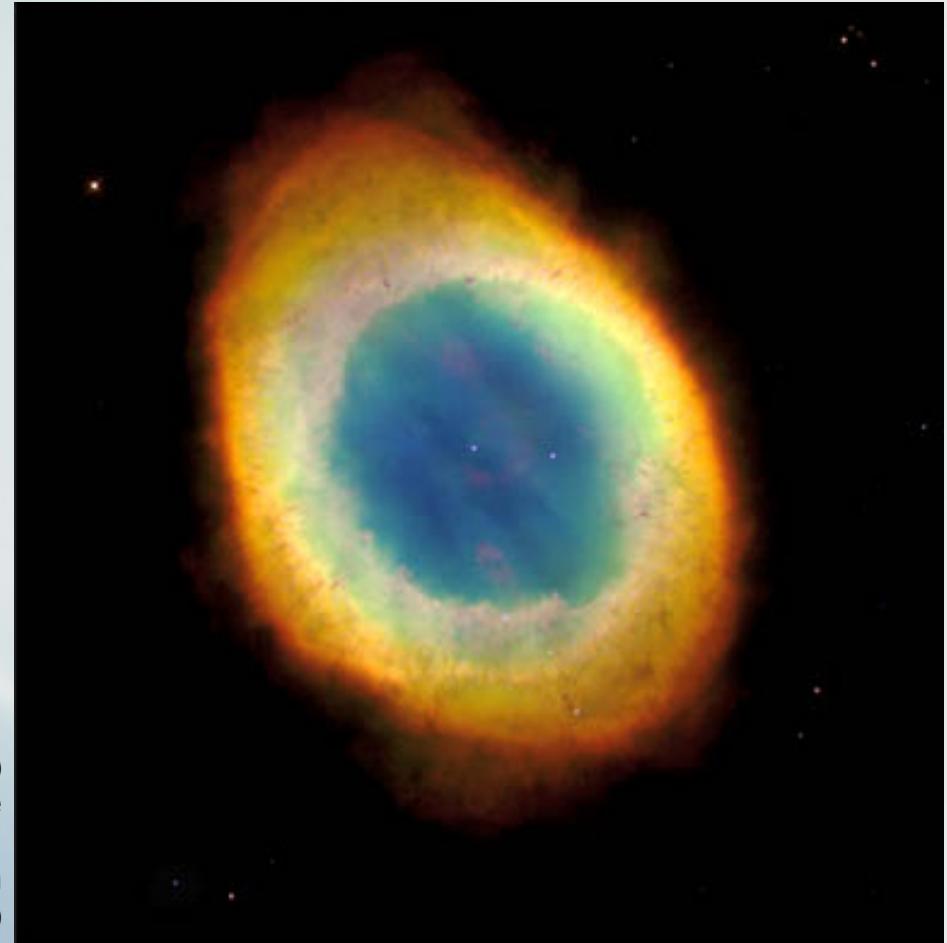


Nébuleuse de l'Hélice prise par le télescope spatial Hubble

Crédits : Wikipedia

Fin de vie d'une étoile de faible masse

- Quelques nébuleuses planétaires...
 - Nébuleuse de la Lyre



Nébuleuse de la Lyre (M57)
prise par le télescope spatial Hubble

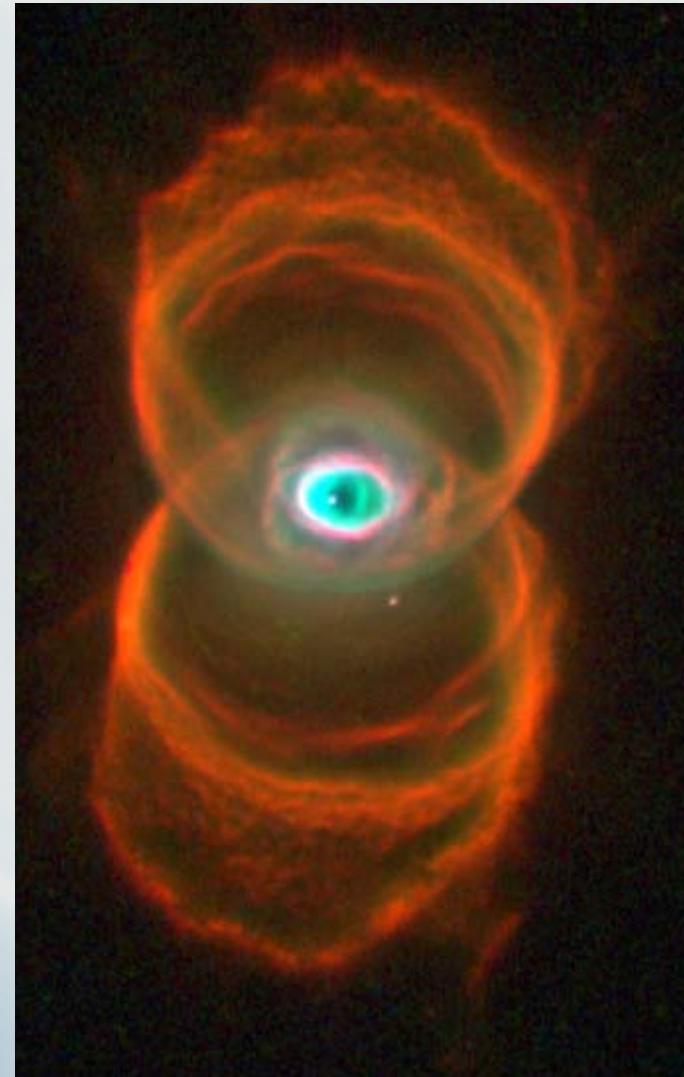
Crédits : Hubble Heritage Team
(AURA/STScI/NASA)

Fin de vie d'une étoile de faible masse

- Quelques nébuleuses planétaires...
 - Nébuleuse MyCn18

Nébuleuse MyCn18 prise par le
Téléscope staial Hubble

Crédits : R. Sahai
J. Trauger (JPL)
WFPC2 Science Team
NASA



Fin de vie d'une étoile de faible masse

- Quelques nébuleuses planétaires...
 - Nébuleuse de l'Eskimo



Nébuleuse de l'Eskimo)
prise par le télescope spatial Hubble

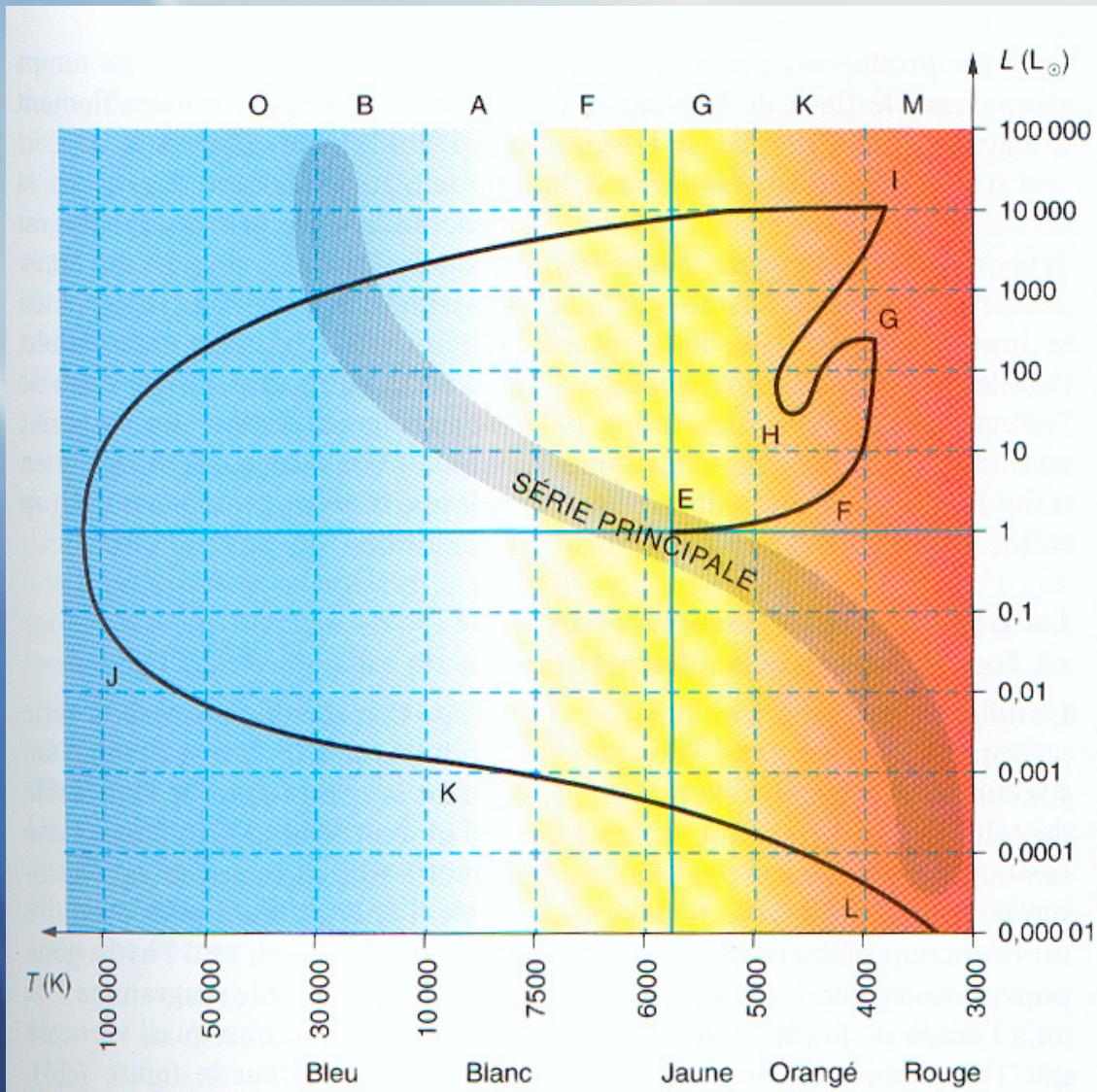
Crédits : NASA/A.

Fruchter/ERO Team (STScI)

Les naines blanches

- Naine blanche : Coeur de l'étoile qui n'a pas été éjecté lors de la phase nébuleuse planétaire.
- Naine ? --> Taille très petite : rayon d'environ 10 000 km (rayon de la Terre : environ 6 000 km !)
- Très grande densité [groupe II : pourquoi ?]
- Blanche ? --> Température très élevée (car le cœur de l'étoile s'est contracté à partir de la phase supergéante). Mais sa luminosité est faible (car très petite)
- La naine blanche n'a pas assez d'énergie pour de nouvelles fusions, elle se refroidit lentement...
- ...elle deviendrait alors une **naine noire** (mais l'Univers est trop jeune pour en contenir)

Récapitulatif : étoiles de faible masse

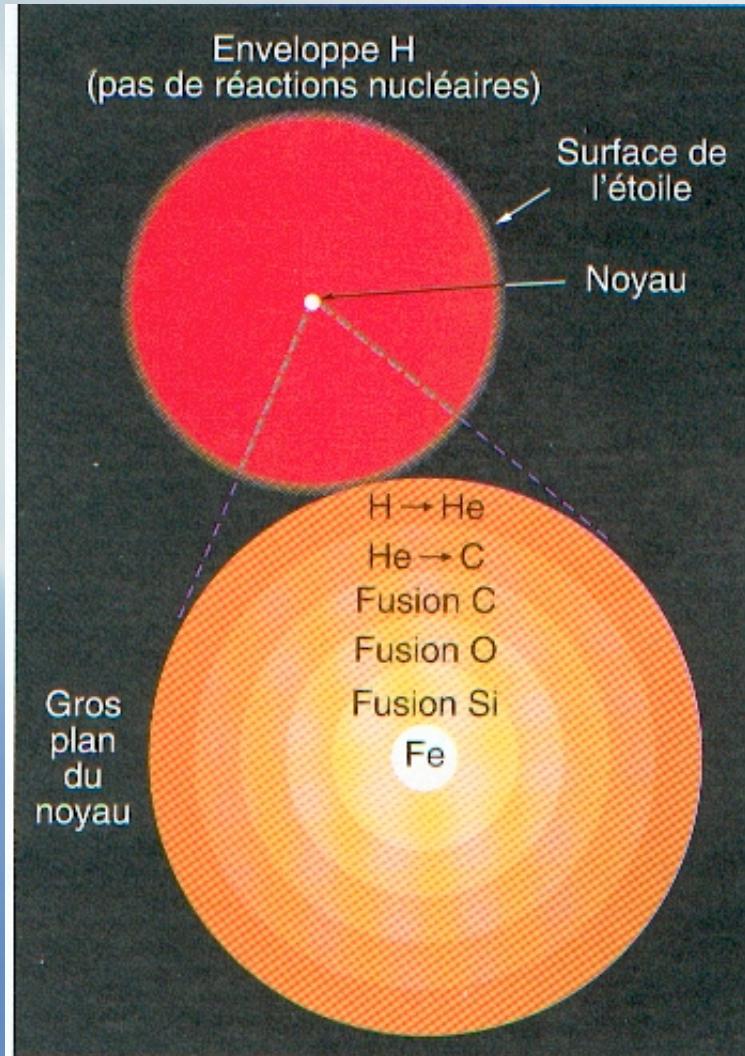


Crédits :
Astronomie et
Astrophysique
M. Séguin, B. Villeneuve

Fin de vie des étoiles de masse importante

- Valable pour des étoiles de masse supérieure à 8 masses solaires
- Leur fin de vie commence comme celle des étoiles de faible masse...
- ...mais en accéléré (car masse importante, donc « brûle » plus vite)...
- ...et sans flash de l'hélium !
- Les étoiles massives sont capables de donner des températures et pressions très élevées
- => permettent la fusion d'atomes plus lourds (hydrogène -> carbone -> oxygène -> silicium -> fer)

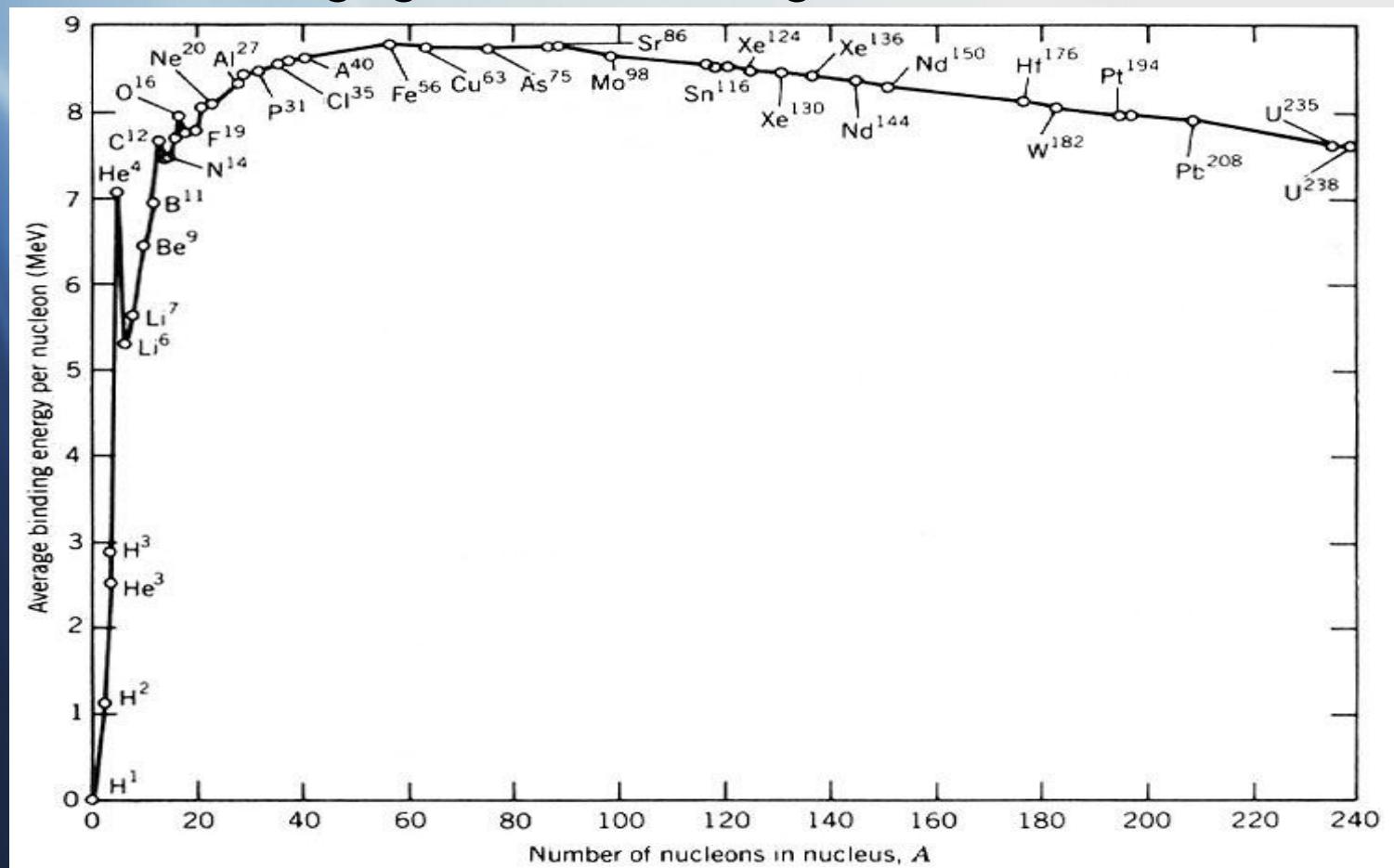
Fin de vie des étoiles de masse importante



Crédits :
M. Séguin, B. Villeneuve
Astronomie et Astrophysique

Fin de vie des étoiles de masse importante

- MAIS il n'y a pas moyen de fusionner les atomes de fer en gagnant de l'énergie !

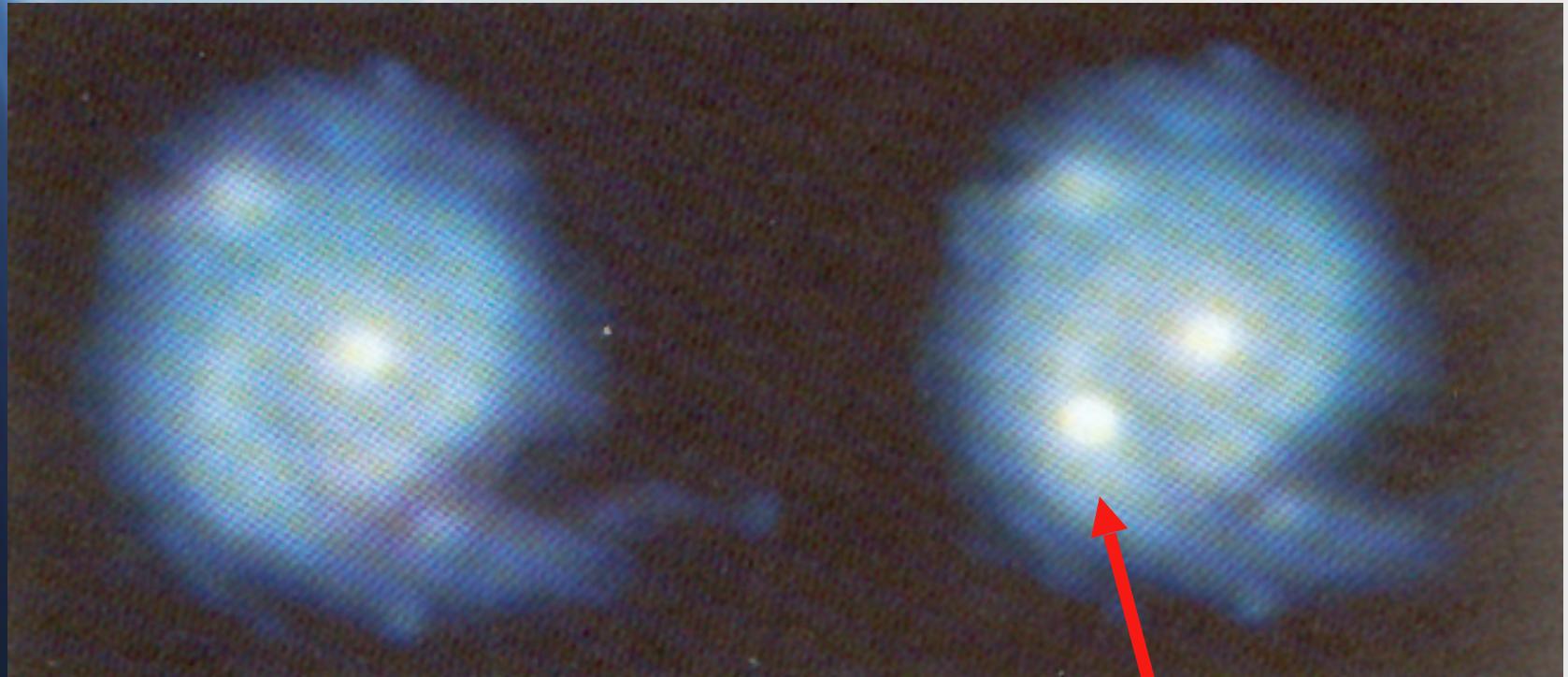


Fin de vie des étoiles de masse importantes

- Conséquence : les atomes de fer s'accumulent au cœur de l'étoile sans se transformer
- C'est la **catastrophe du fer** !
- [groupe II] La pression au cœur de l'étoile devient telle que les protons et électrons sont forcés de se combiner pour donner des neutrons
- Le cœur de l'étoile se remplit donc de neutrons qui se « tassent » le plus possible (densité énorme !)
- Toute la matière tombe vers le cœur de l'étoile, se transforme en neutrons, et continue à tomber
- Le cœur atteint une densité trop grande...
- ...et se relâche en émettant une onde de choc
- Plus cette onde de choc se propage, plus elle est rapide...
- ...jusqu'à atteindre la surface de l'étoile, où elle expulse toutes les couches externes
- L'étoile est devenue une **supernova (de type II)** !

Fin de vie des étoiles de masse importantes

- Les supernovae - quelques chiffres...
 - Luminosité : jusqu'à 10 milliards de fois celle du Soleil !



Galaxie NGC 3310 avant et après l'explosion d'une supernova
Crédits : M. Séguin, B. Villeneuve, Astronomie et Astrophysique

Fin de vie des étoiles de masse importantes

- Les supernovae - quelques chiffres...
 - Au départ de l'étoile, la vitesse d'éjection peut atteindre la moitié de la vitesse de la lumière
 - Fréquence : assez rares à observer
 - 1054 : Nébuleuse du Crabe (Taureau)
 - 1181 : (Cassiopée)
 - 1572 : Supernova de Tycho Brahé (Cassiopée)
 - 1604 : Supernova de Kepler (Serpentaire)
 - 1987 : SN1987A (Grand Nuage de Magellan, Dorade)

Fin de vie des étoiles de masse importantes

- La nébuleuse du Crabe



Crédit :

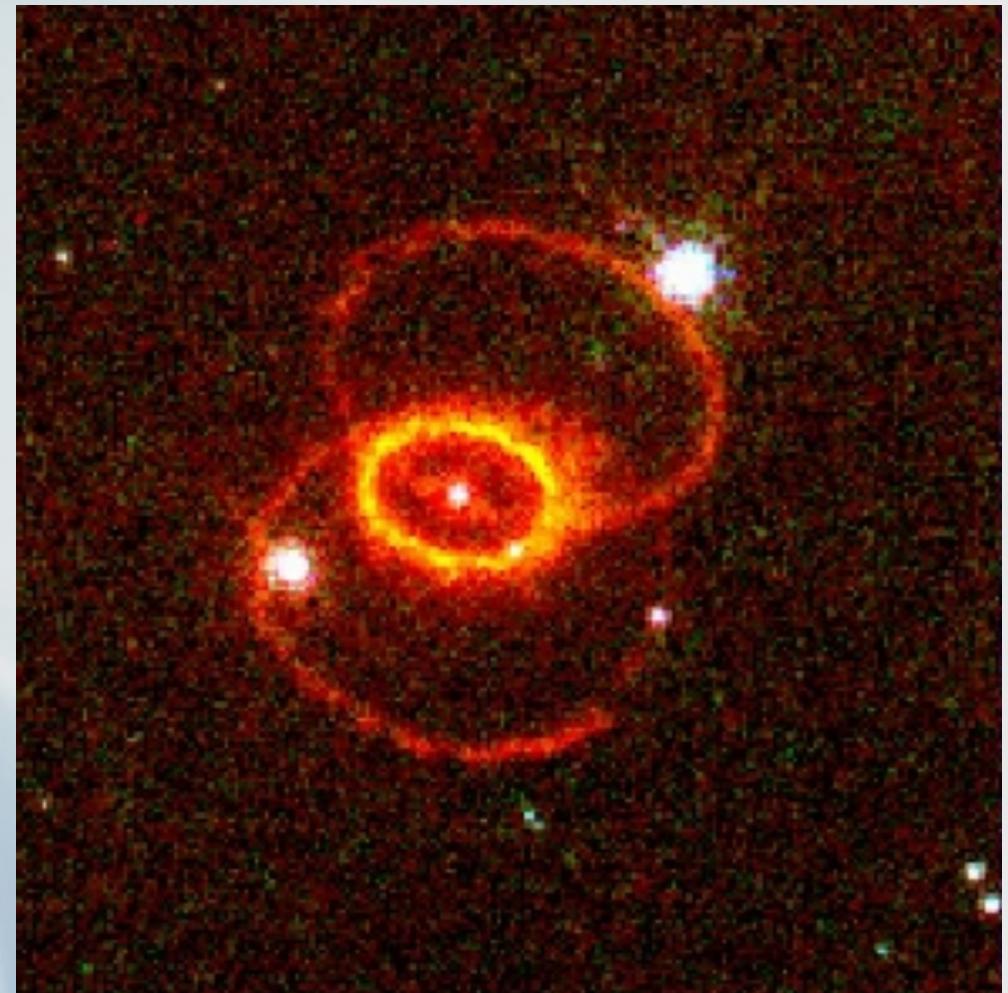
ESO/KUEYEN

Fin de vie des étoiles de masse importantes

- Petit exercice :-) [groupe II]
 - Sachant que la supernova a explosé en 1054, qu'elle est située à 6500 années lumière de la Terre et qu'elle mesure environ 6 années-lumière de diamètre, calculez à quelle vitesse les filaments de lumière s'éloignent du centre.
 - Réponse...
 - Environ 1000 km/s
 - Quelle fraction de la vitesse de la lumière cela représente-t-il ?
 - Réponse...
 - Environ 1/300e de la vitesse de la lumière

Fin de vie des étoiles de masse importantes

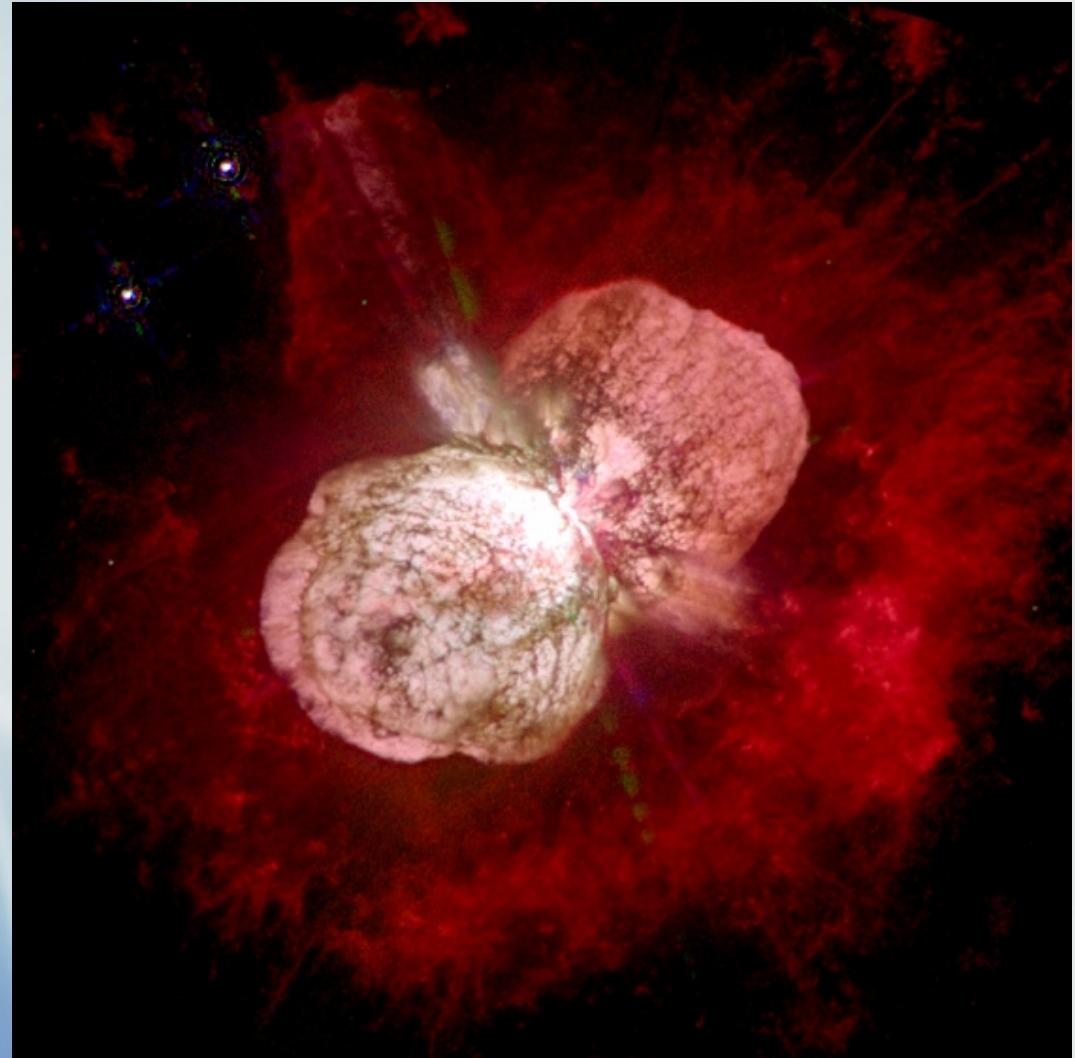
- La supernova SN1987A



Crédit :
Chris Burrows (STScI)
WFPC2 Science Team
NASA

Fin de vie des étoiles de masse importantes

- La nébuleuse
Eta de la Carène



Crédit :
Jon Morse (University of Colorado)
NASA

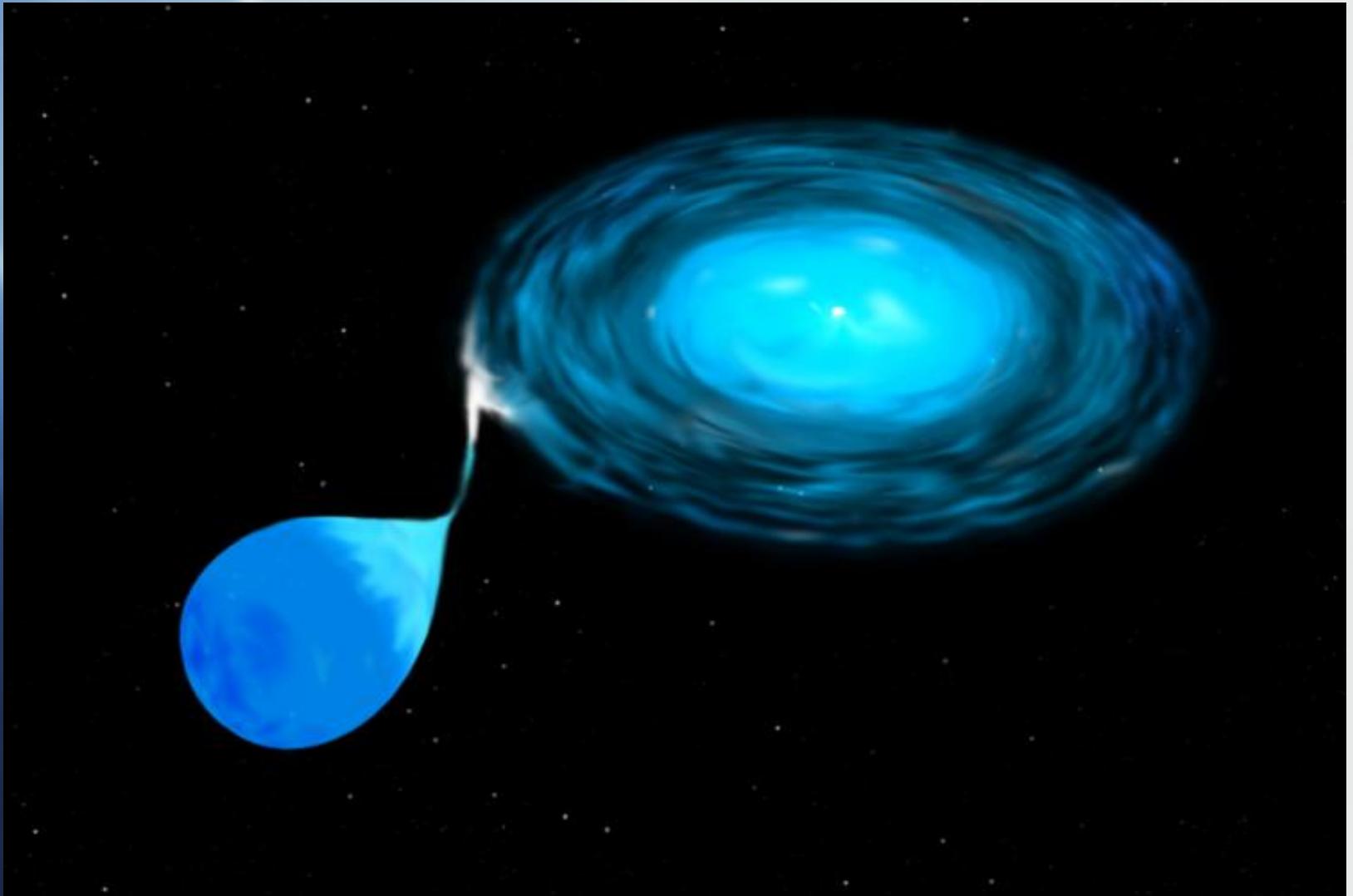
Les étoiles doubles

- Les systèmes binaires
 - Système constitué de deux étoiles qui s'«attirent» mutuellement (par la gravitation)
 - La plus grosse étoile peut devenir une géante avant l'autre (car masse plus élevée)
 - Il peut y avoir transfert de matière de la géante vers l'autre étoile
 - Comme le système tourne, la matière spirale autour de l'étoile => disque d'accrétion
 - => Température et luminosité augmentent
- Les novae
 - Elles ont longtemps été confondues avec les supernovae (apparition d'une *nouvelle* étoile dans le ciel)
 - Cependant les novae et les supernovae n'ont rien à voir !

Les étoiles doubles

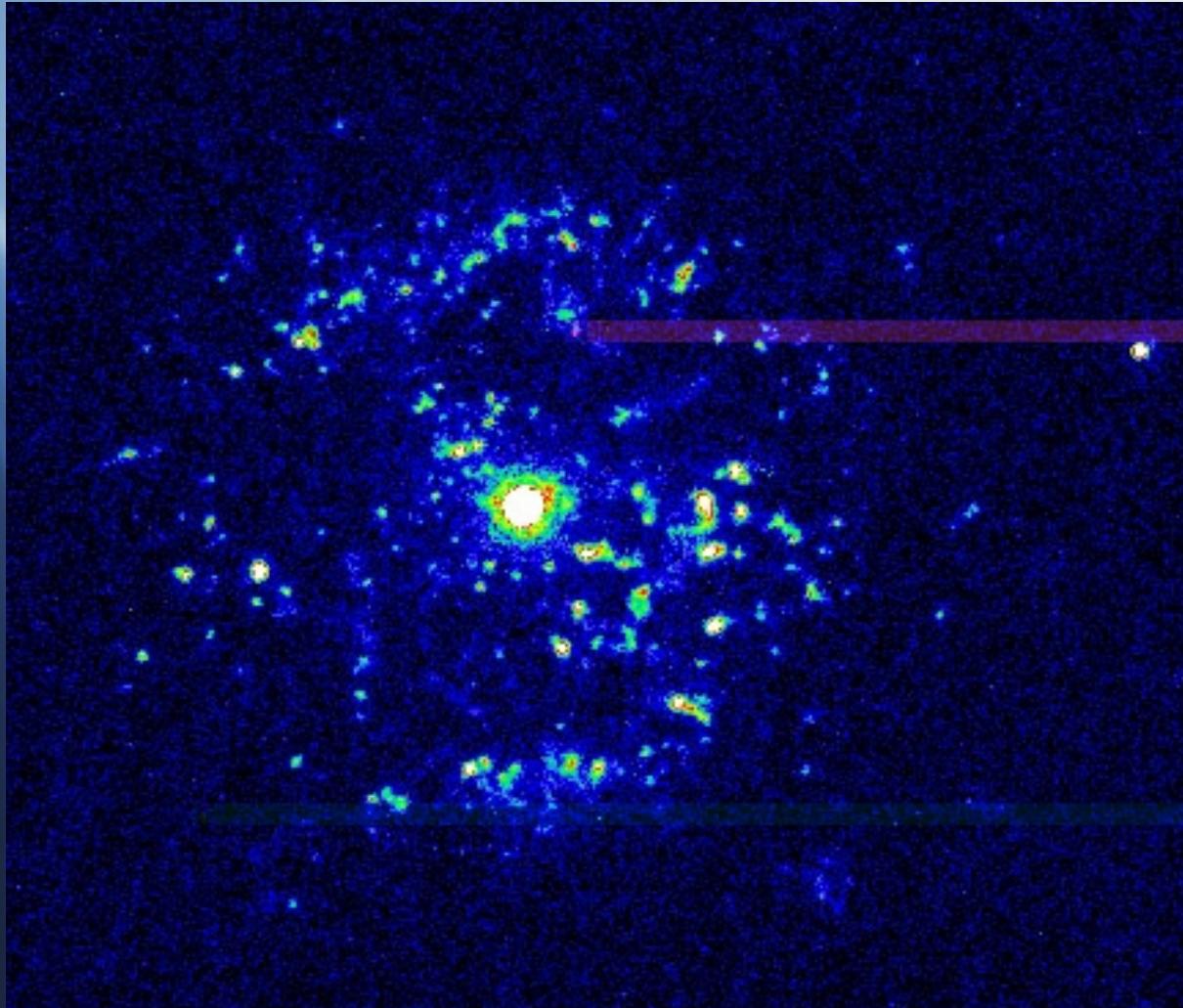
- Il s'agit du résultat d'un transfert de matière d'une **géante** vers une **naine blanche** (système binaire).
- L'hydrogène s'accumule sur la naine blanche et chauffe (gravité)
- Il peut y avoir un nouveau **flash de l'hélium**, suivi d'une éjection des couches externes

Les étoiles doubles



Vue d'artiste d'un transfert de matière au sein d'un système binaire

Les étoiles doubles



Nova T de la Boussole

Crédit :
Mike Shara (STScI)
Bob Williams (STScI)
David Zurek (STScI)
Roberto Gilmozzi (ESO)
Dina Prialnik (Université de
Tel Aviv)

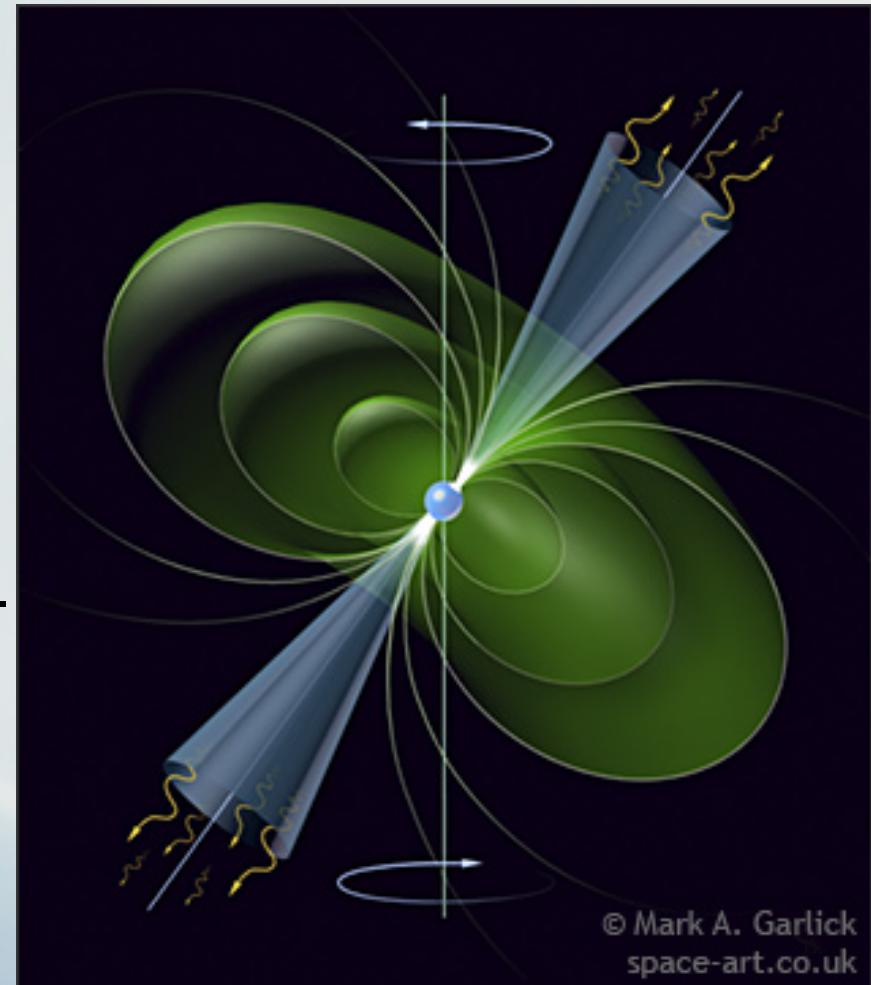
NASA

Les étoiles à neutrons

- Rappel
 - Au cœur de l'étoile mourante (> 8 masses solaires) se forment des neutrons qui s'empilent
 - L'étoile explose (supernova de type II), ne laissant que son cœur
- Une étoile à neutrons est donc le vestige d'une supernova, constitué d'un empilement de neutrons
- Extrêmement petit (environ 10 km de rayon)
- Extrêmement dense (environ 10^{17} kg/m³) !
- Extrêmement chaud (environ 10⁶ K)... mais se refroidit
- Peut-on les détecter ?
 - Oui !

Les étoiles à neutrons

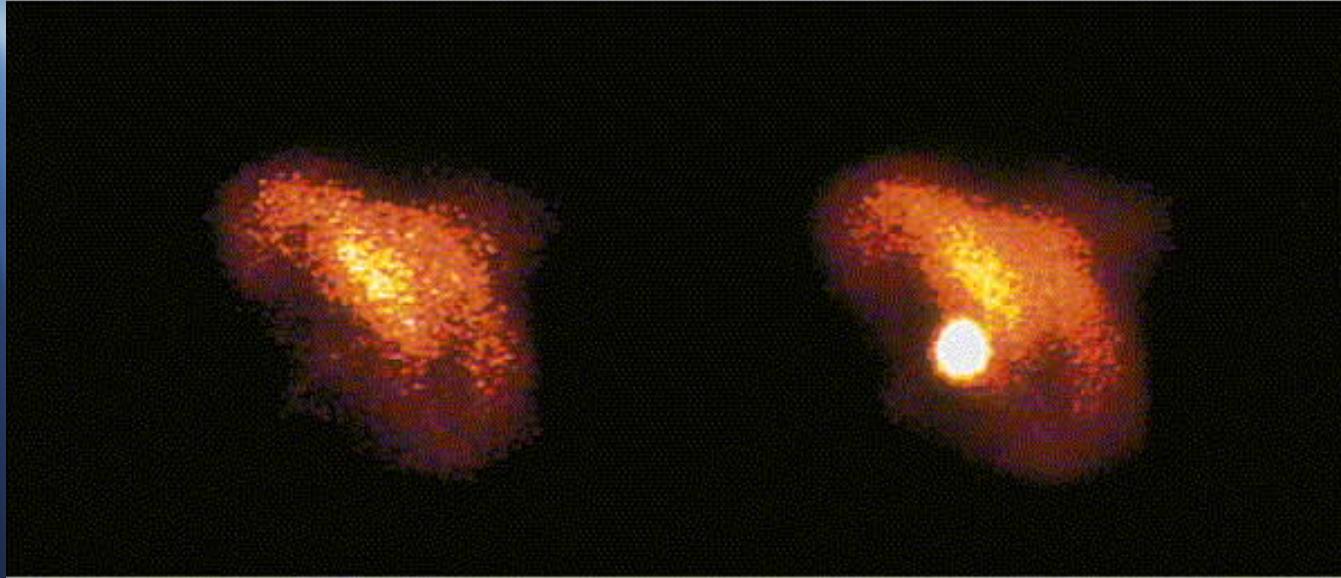
- Les pulsars
 - Découvert par Jocelyn Bell en 1967
 - Objet qui émet de brèves impulsions lumineuses très régulièrement (???)
 - Etoile à neutron en rotation extrêmement rapide, et qui émet de la lumière selon deux cônes diamétralement opposés...
 - ...un peu comme un phare !



© Mark A. Garlick
space-art.co.uk

Les étoiles à neutrons

- Les pulsars



Images en rayons X
de la nébuleuse du
Crabe



Crédits : Adam Frank
(University of
Rochester)

Les étoiles à neutrons

- Pourquoi des étoiles à neutrons émettraient-elles de la lumière ? Et pourquoi dans une (ou deux) direction(s) ?
 - Très compliqué...
 - Particules chargées dans le champ magnétique intense de l'étoile à neutrons, etc...
- Donc, tous les pulsars sont des étoiles à neutrons
- Mais toutes les étoiles à neutrons ne sont pas forcément des pulsars !
 - Plus un pulsar est vieux, moins il a d'énergie, moins il brillera
 - Si on ne se trouve pas dans le cône de lumière du pulsar, on ne le verra que comme une étoile à neutrons

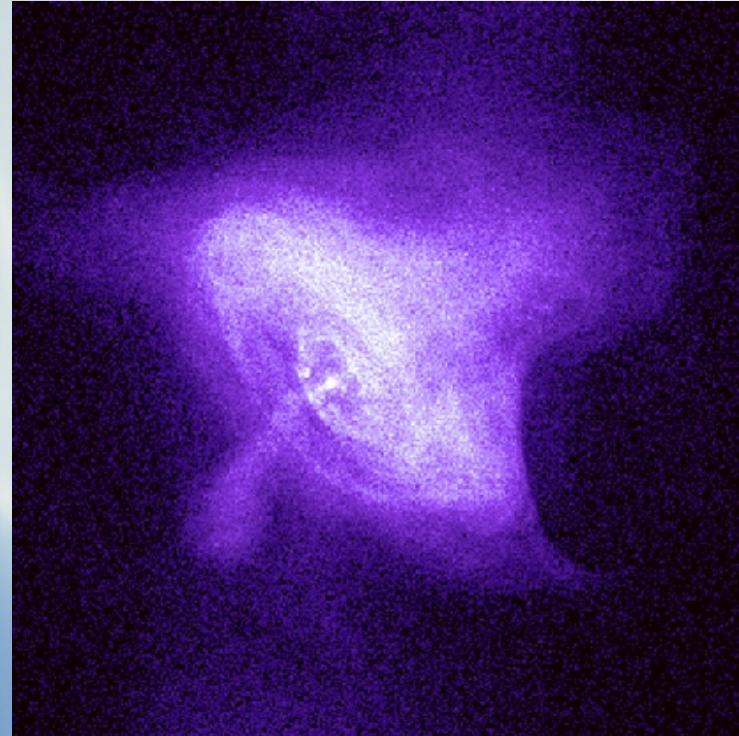
Les étoiles à neutrons



Images en rayons X
de la nébuleuse
du Crabe

Crédits :
NASA/CXC/SAO

Les étoiles à neutrons



Images en rayons X
de la nébuleuse
du Crabe

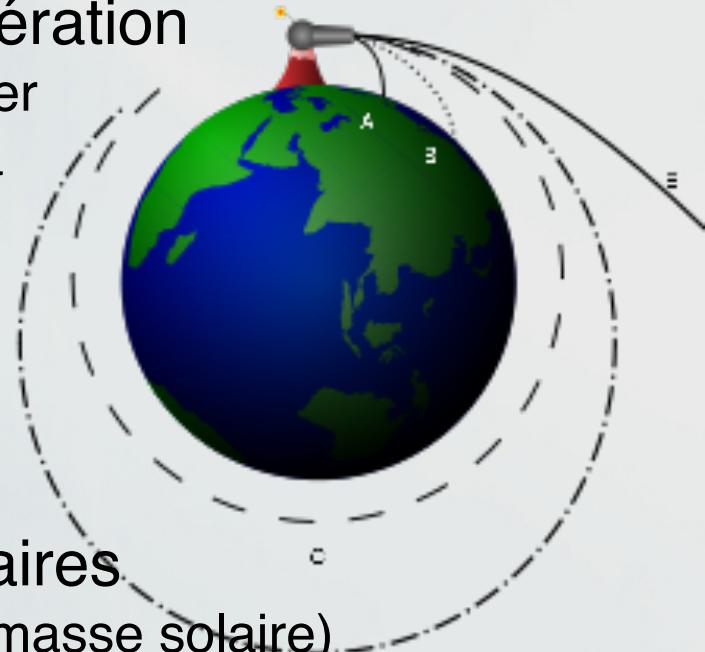
Crédits :
NASA/CXC/SAO

Les étoiles à neutrons

- Systèmes binaires d'étoiles à neutrons [groupe II]
 - Deux étoiles à neutrons qui tournent l'une par rapport à l'autre
 - On en a découvert un !
 - Après un certain temps, les 2 étoiles à fusion doivent entrer en collision et donner une énergie lumineuse inimaginable en quelques secondes
 - On a observé de tels phénomènes (brefs sursauts lumineux dans des galaxies extrêmement lointaines)
 - Mais tous les astronomes ne sont pas d'accord (**hypernovae** (?) ,...)

Les trous noirs

- Introduction : vitesse de libération
 - Vitesse à laquelle il faut lancer un objet pour qu'il échappe à l'attraction d'une étoile ou d'une planète
- Rappel : les cadavres stellaires
 - Les naines blanches ($< 1,4$ masse solaire)
 - Les étoiles à neutrons (entre 1,4 masse solaire et 3 masses solaires)

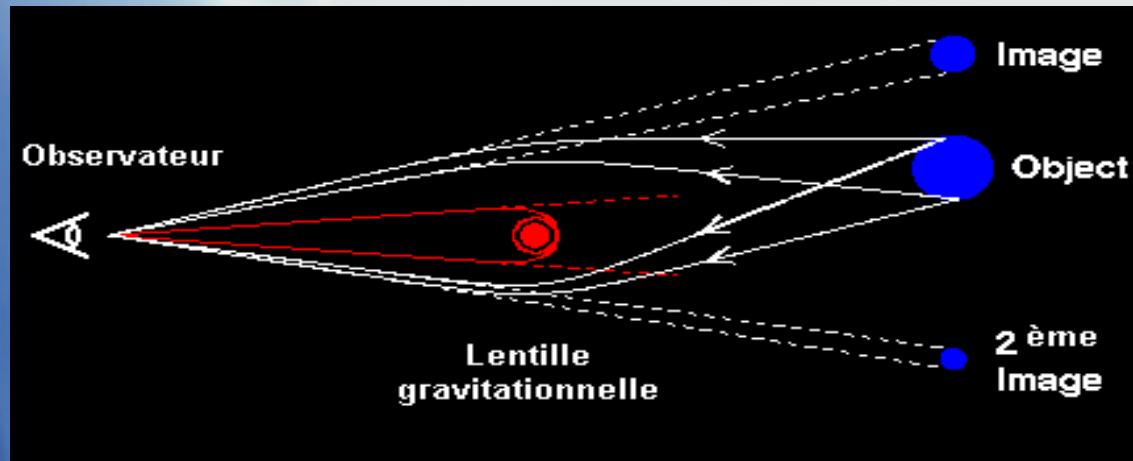


Les trous noirs

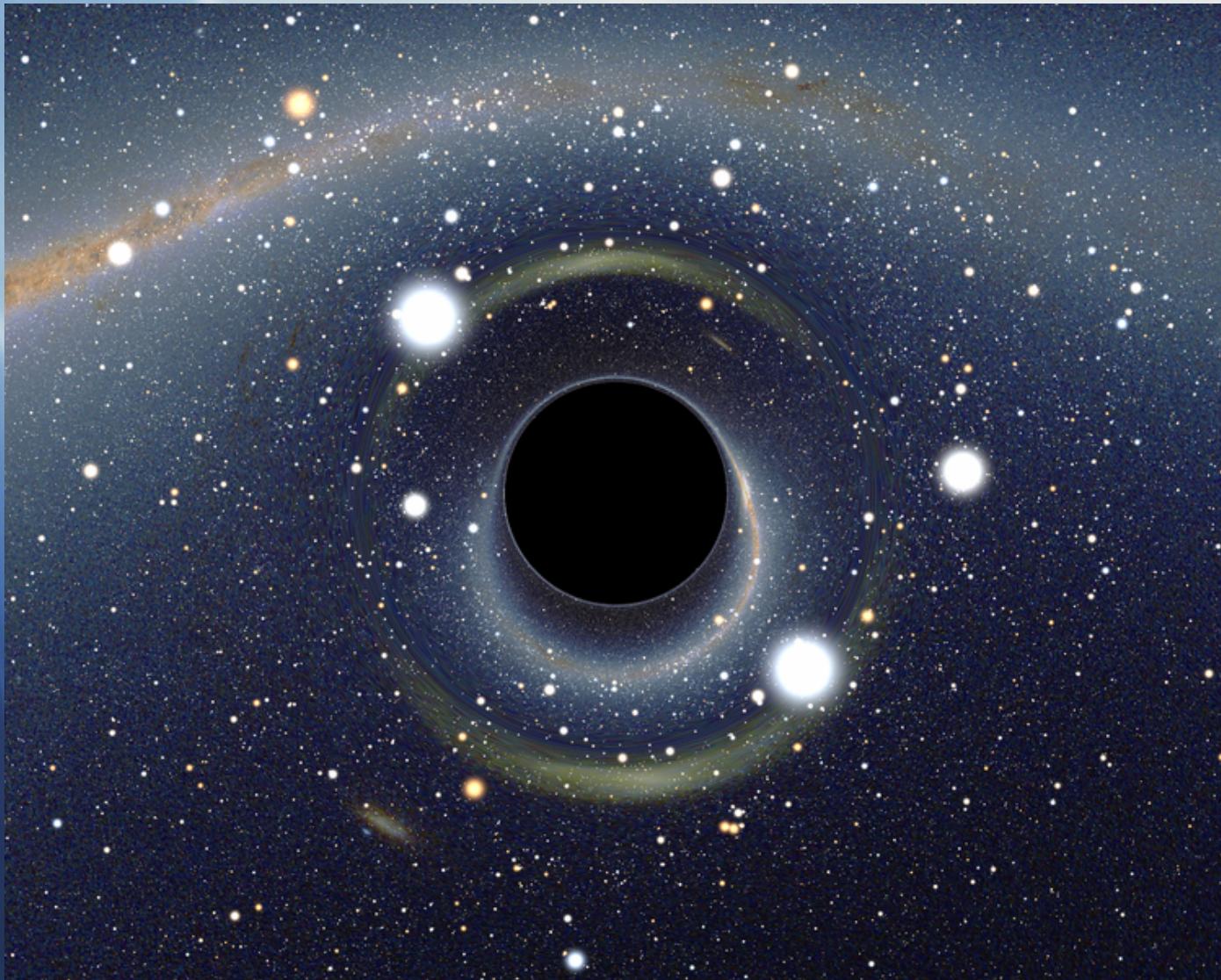
- Les trous noirs stellaires
 - Pour une étoile à neutrons dont la masse vaut 3 masses solaires, la vitesse de libération égale la vitesse de la lumière !
 - Dès lors, rien, pas même la lumière, ne peut s'en échapper
 - Un **trou noir stellaire** est donc une étoile à neutron de plus de 3 masses solaires
 - Il existe un autre type de trou noir : les trous noirs supermassifs
- Le rayon de Swarzschild
 - Rayon auquel une masse doit être compressée pour devenir un trou noir

Les trous noirs

- Il vaut : R_s (km) = $3M$ (masses solaires) [groupe II : démonstration ?]
- Exemple : Si on comprimait le Soleil dans une sphère de 3 km de rayon, il deviendrait un trou noir...
- ...mais la Terre continuerait normalement sur son orbite
- Un trou noir n'est pas un aspirateur cosmique géant !



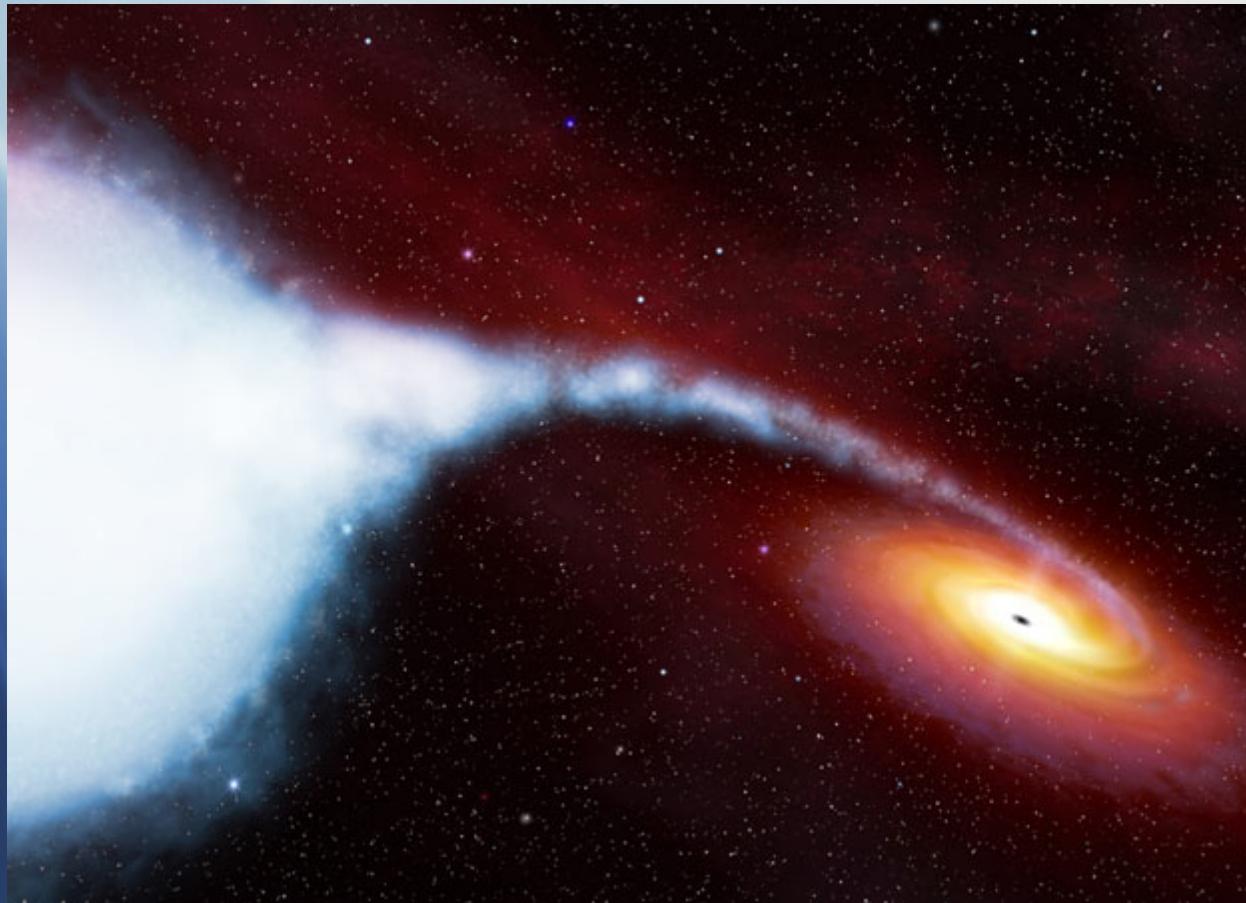
Les trous noirs



Vue
d'artiste
d'un trou
noir

Les trous noirs

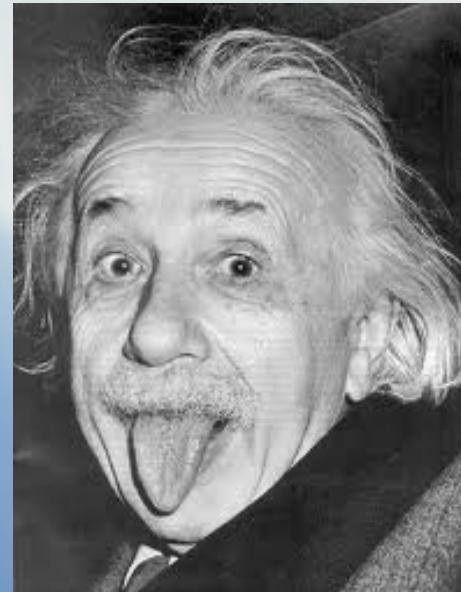
- Si on ne les voit pas, comment les détecter ?
 - Si un trou noir attire la matière d'une autre étoile, elle se met à tourner autour et à chauffer, donc on pourra la voir



Vue d'artiste
d'un trou noir

Les trous noirs

- Les trous noirs existent-ils ?
 - Dur de le prouver puisqu'on ne peut pas les observer directement...
 - ...mais on est quasiment sûr qu'ils existent
 - La relativité générale d'Einstein les prévoit



Fin :-)