

Objets Compacts



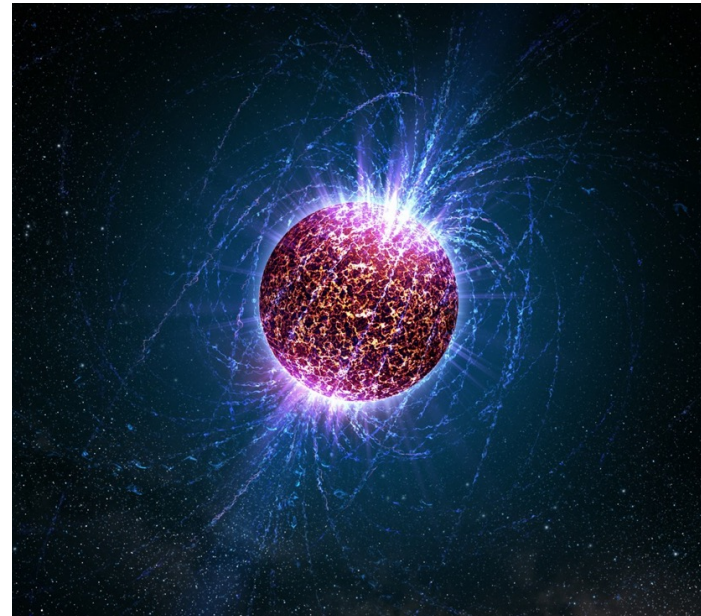
Définition

3 catégories:

Naines blanches



Étoiles à neutrons



Trous noirs



Points communs:

- Stade final de la vie des étoiles (plus de réaction thermonucléaires)
- Petite taille (\leq Terre) - Grande densité
- Champ gravitationnel très important (gravitation relativiste)

Naines blanches

H. N. Russell (1910)

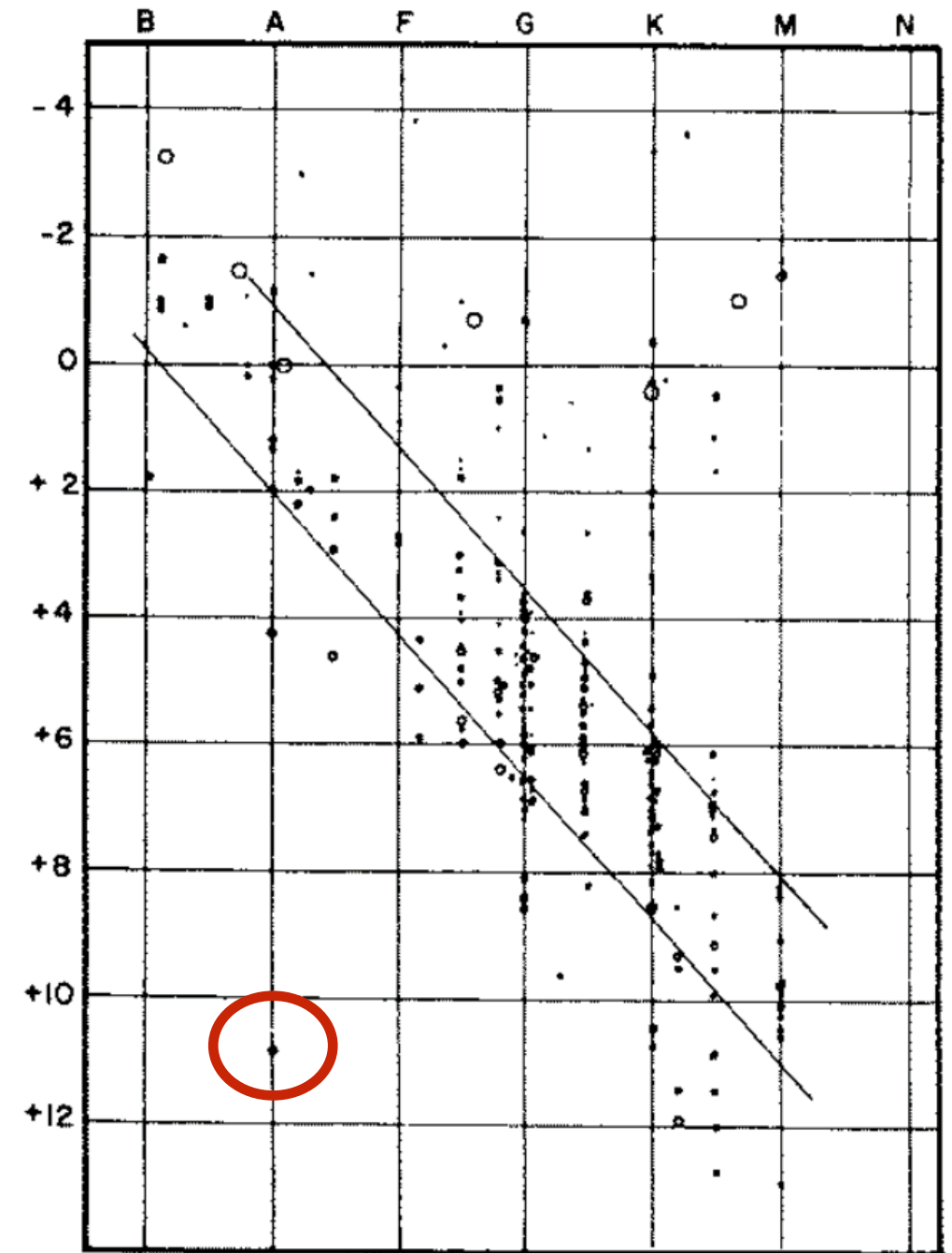
- Les étoiles blanches (classe B et A) sont lumineuses... Sauf une...
- Petite (car peu lumineuse) et blanche...
Appelons-là *naine blanche* !

W. S. Adams (1915)

- Mesure de la masse et du rayon de Sirius B
- $M = 1 M_{\odot}$, $R = 5850 \text{ km} \rightarrow \rho = 3 \times 10^9 \text{ kg/m}^3$!!
- Champ gravitationnel intense. Quelle pression peut contre-balancer la gravité ?

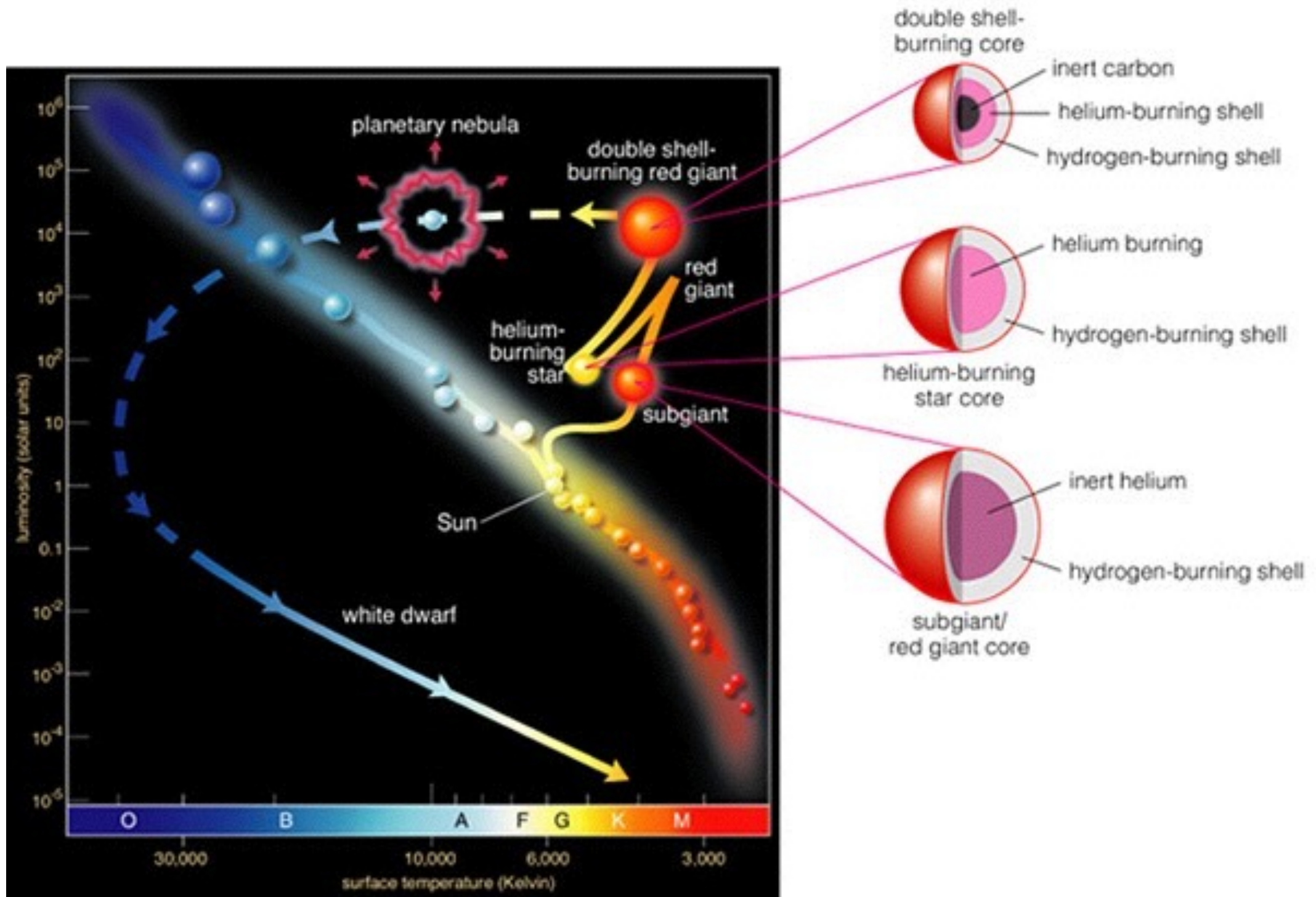
A. Eddington (1926)

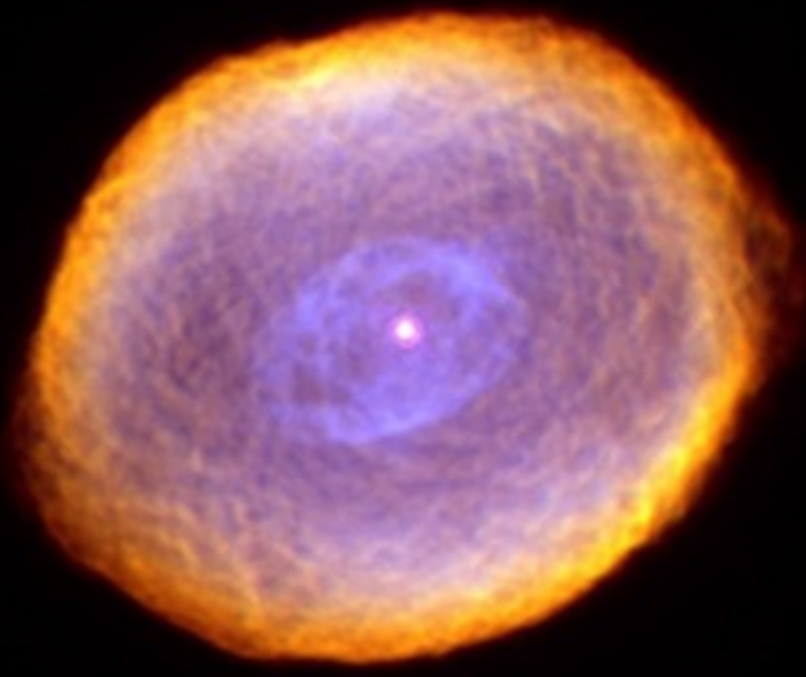
- La formule des gaz parfaits $P = nkT$ ne s'applique certainement pas dans les naines blanches ...



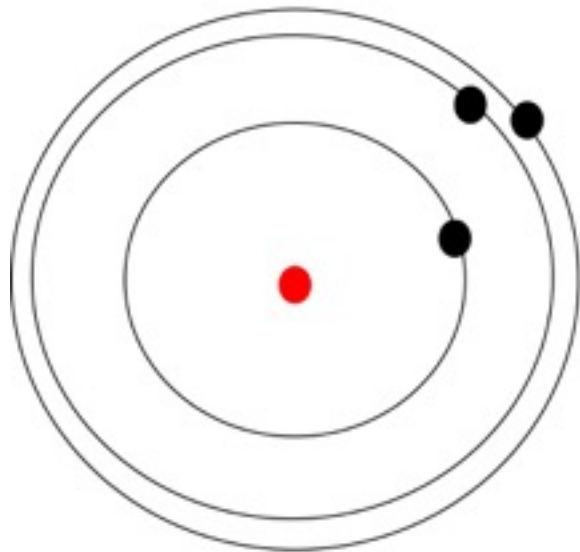
Formation des naines blanches

Étoile de faible/moyenne masse $0.08 M_{\odot} < M < 8 M_{\odot}$

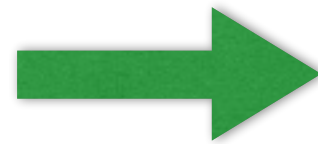




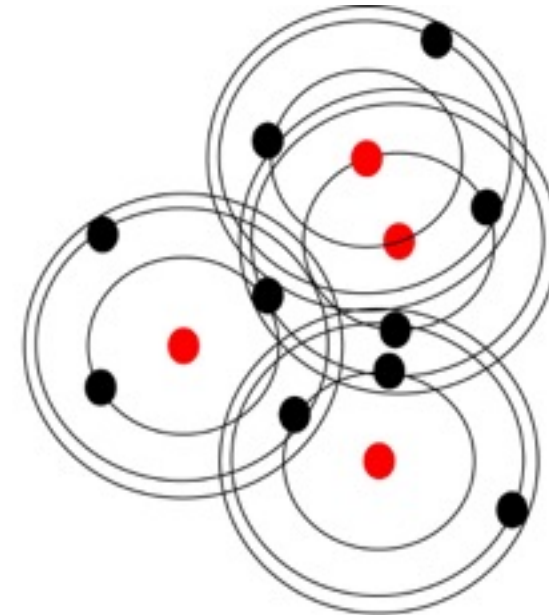
Pression de dégénérescence



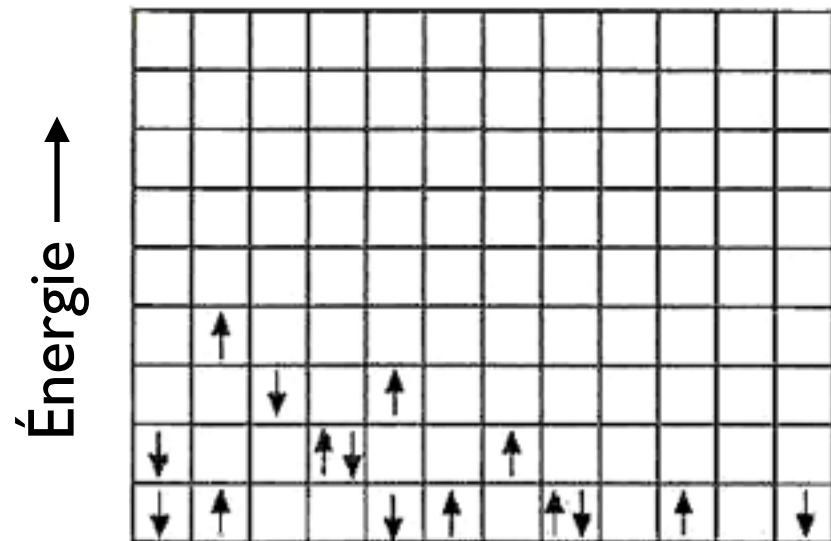
Normal Gas



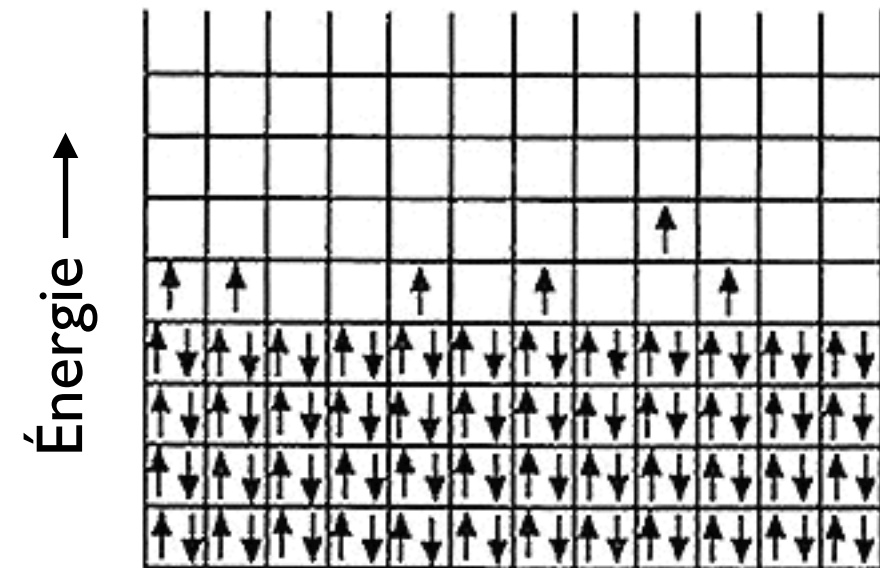
Gravité



Degenerate Gas



Position →

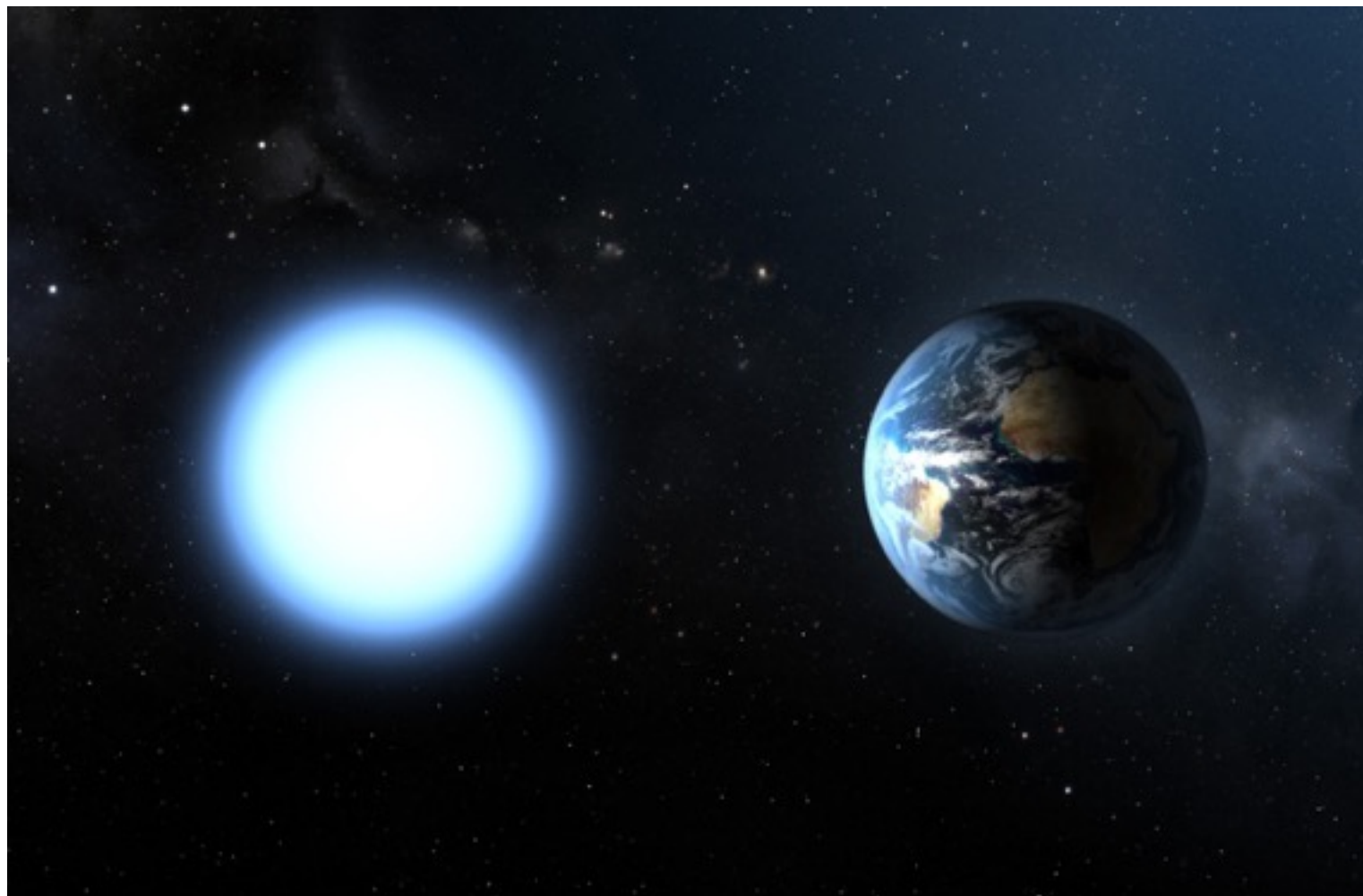


Position →

Principe d'exclusion de Pauli

Naines blanches

- Le noyau résultant s'appelle une naine blanche.
- À leur formation, elles sont très chaudes ($\sim 3 \times 10^5$ K)
- Après environ un siècle, la température a diminué de $\sim 90\%$.



- Vitesse de libération ~ 6000 km/s
- Densité $\sim 1 \times 10^9$ kg/m³
 - ➔ Un million de fois celle de l'eau
 - ➔ Une cuillère à café pèse autant qu'un éléphant !
- Plus la naine blanche est massive, plus elle est petite !

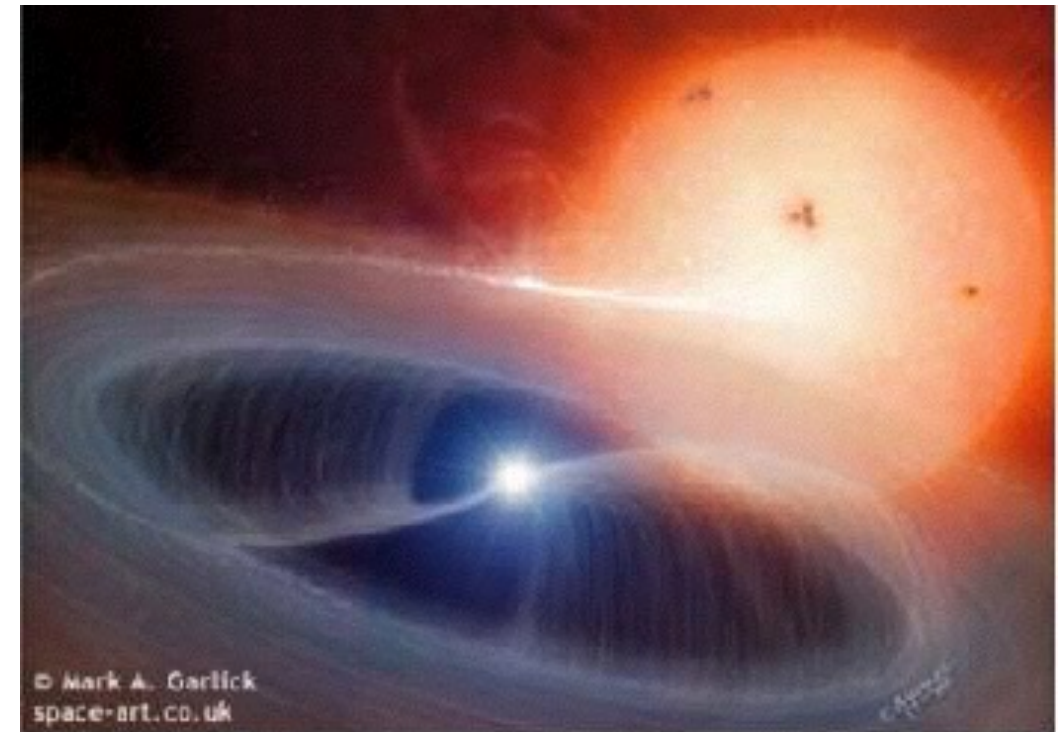
Observations

- Variables cataclysmiques

Systeme binaire étoile + naine blanche

Formation d'un disque d'accrétion

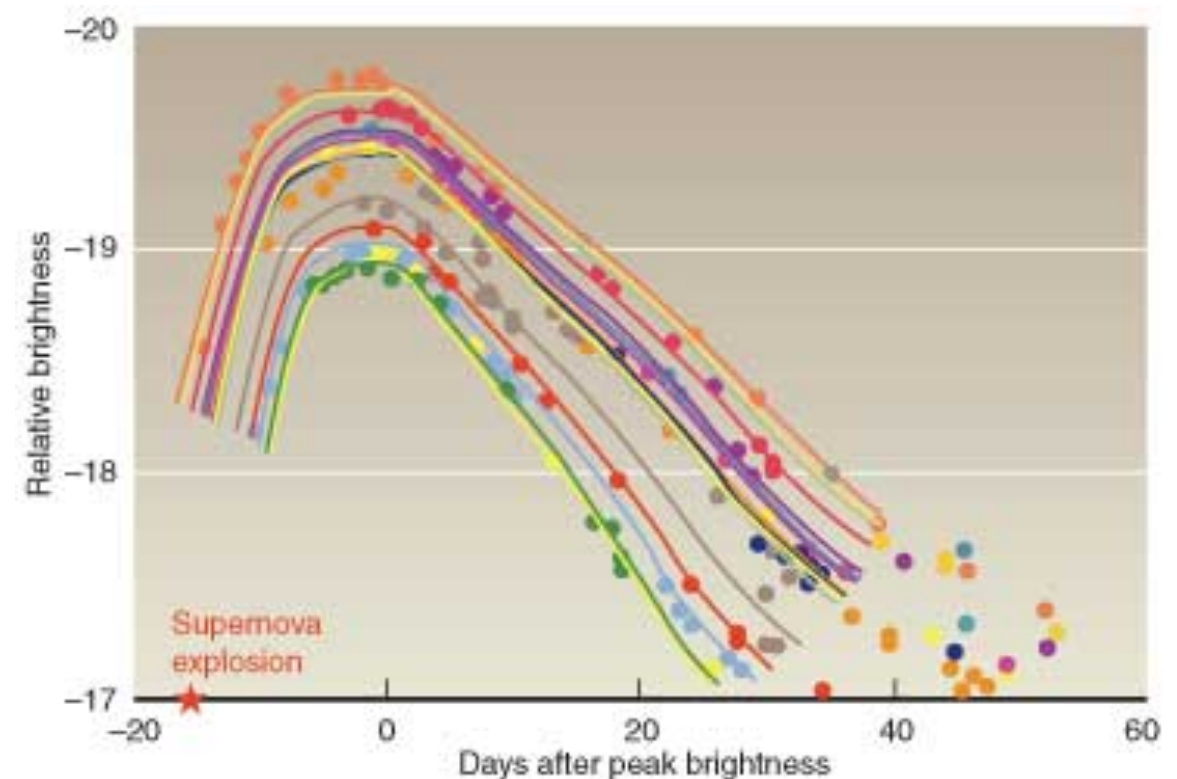
Eruptions régulières du disque



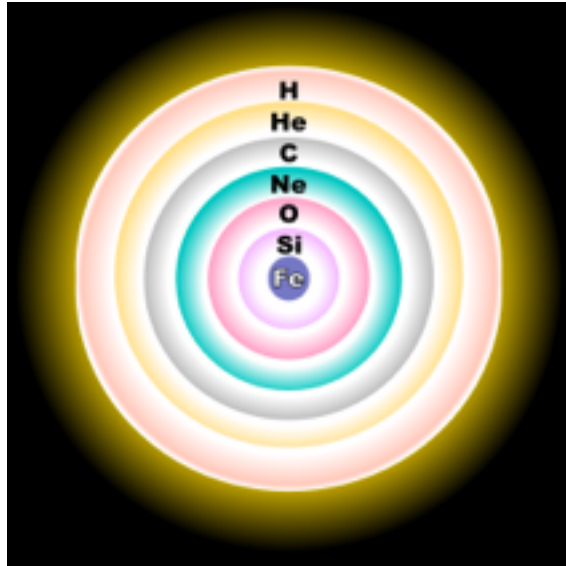
- Supernova type Ia

Explosion d'une naine blanche due à la fusion du carbone

Utiliser en cosmologie: mesure de l'expansion accélérée de l'Univers (prix Nobel 2012)



Étoiles de 8 à 20 M_{\odot}

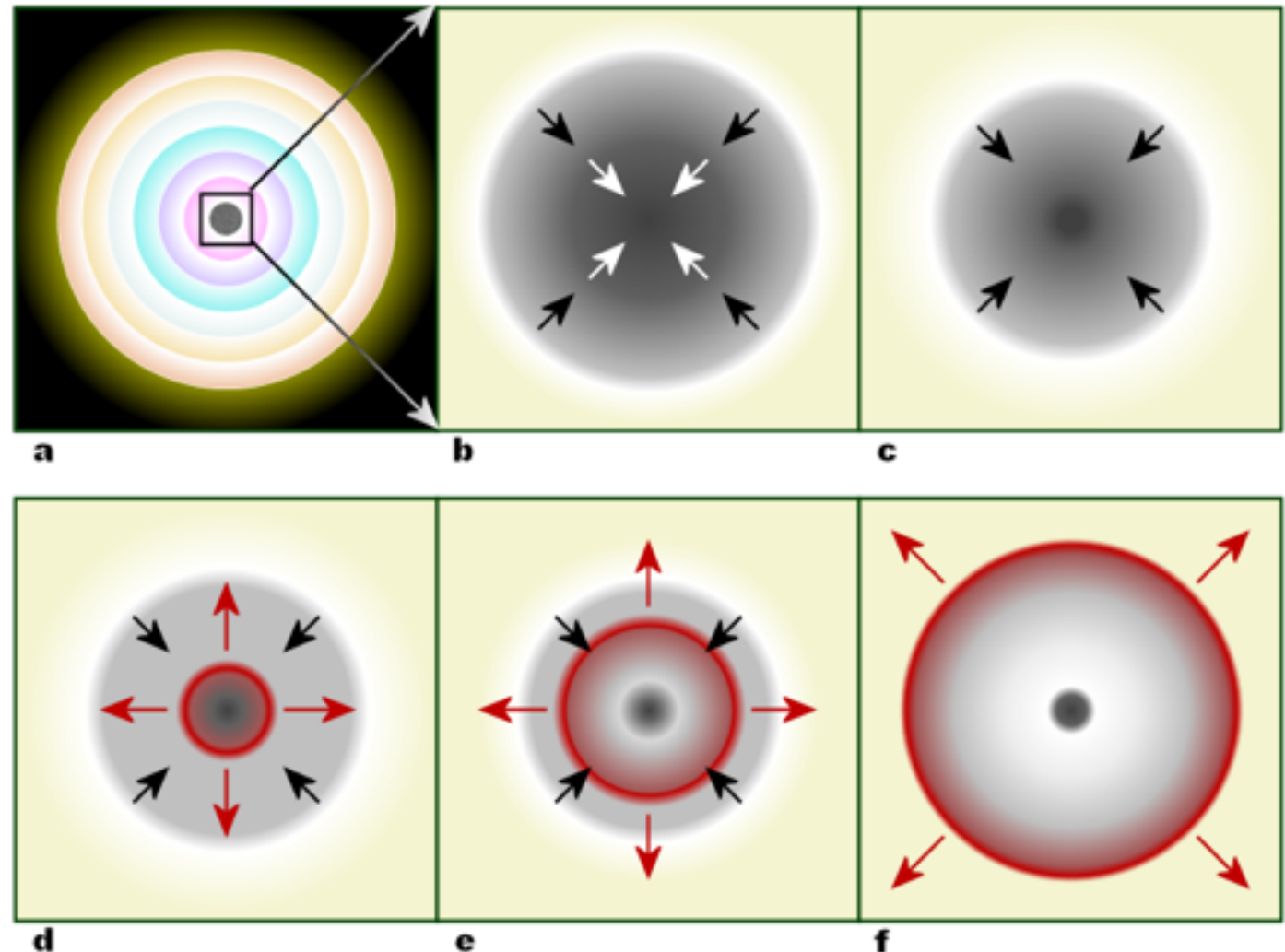


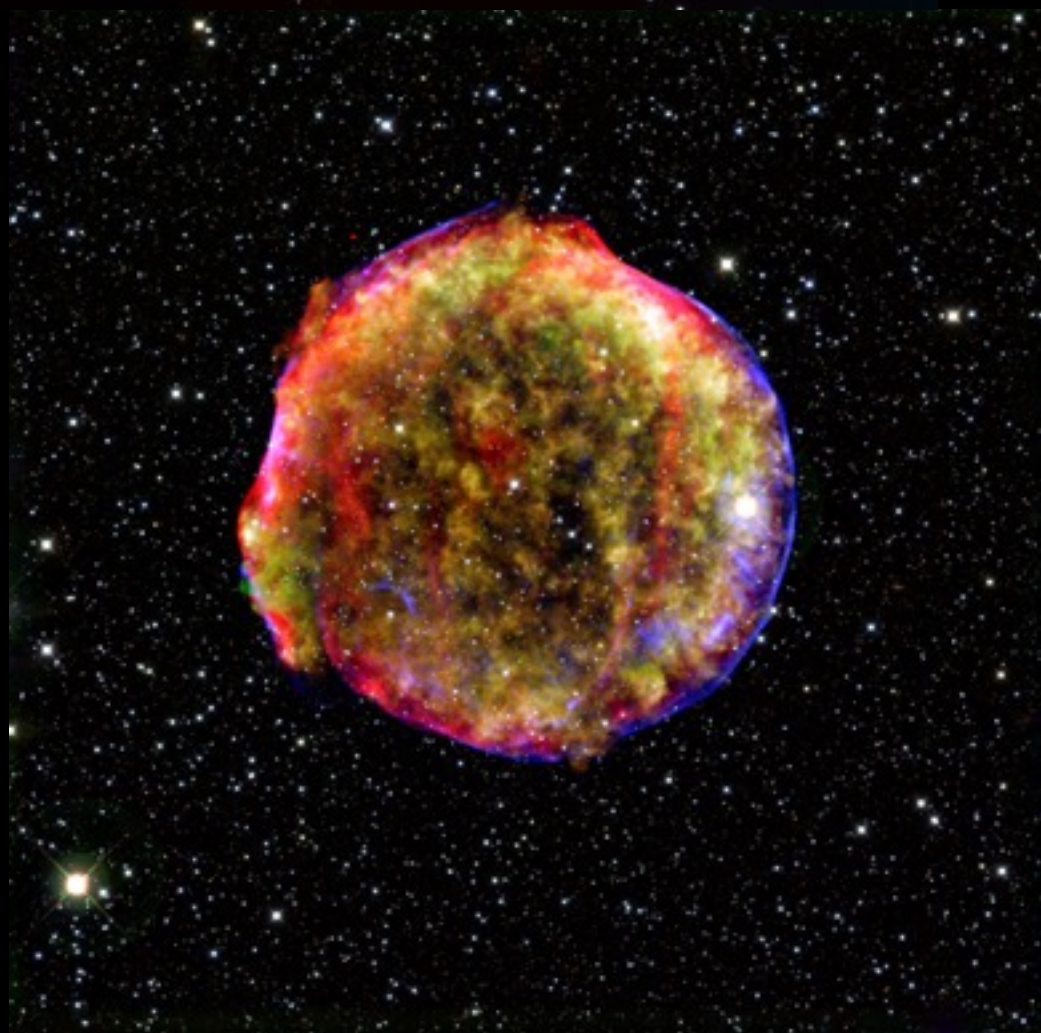
Ces étoiles sont capables de synthétiser des éléments jusqu'au Fer.

Au delà, il faut fournir de l'énergie pour que le Fer fusionne.
(réaction endothermique)

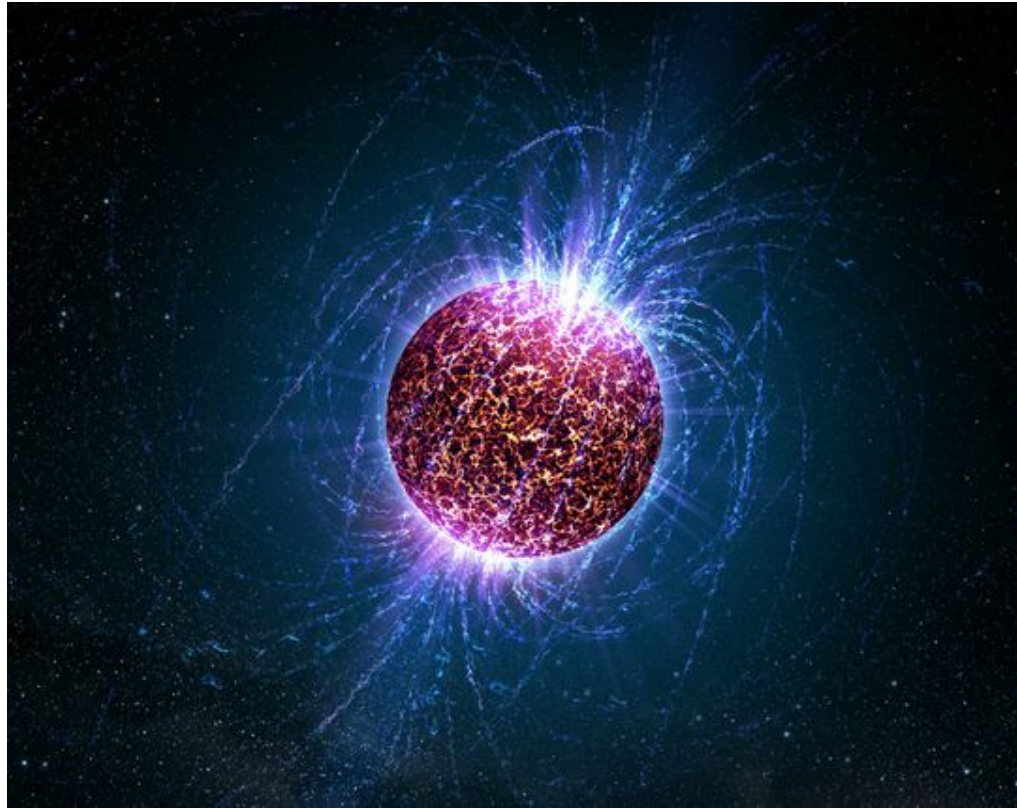
$$M_{\text{Fe}} > 1.4 M_{\odot}$$

Masse de Chandrasekhar





Étoiles à neutrons



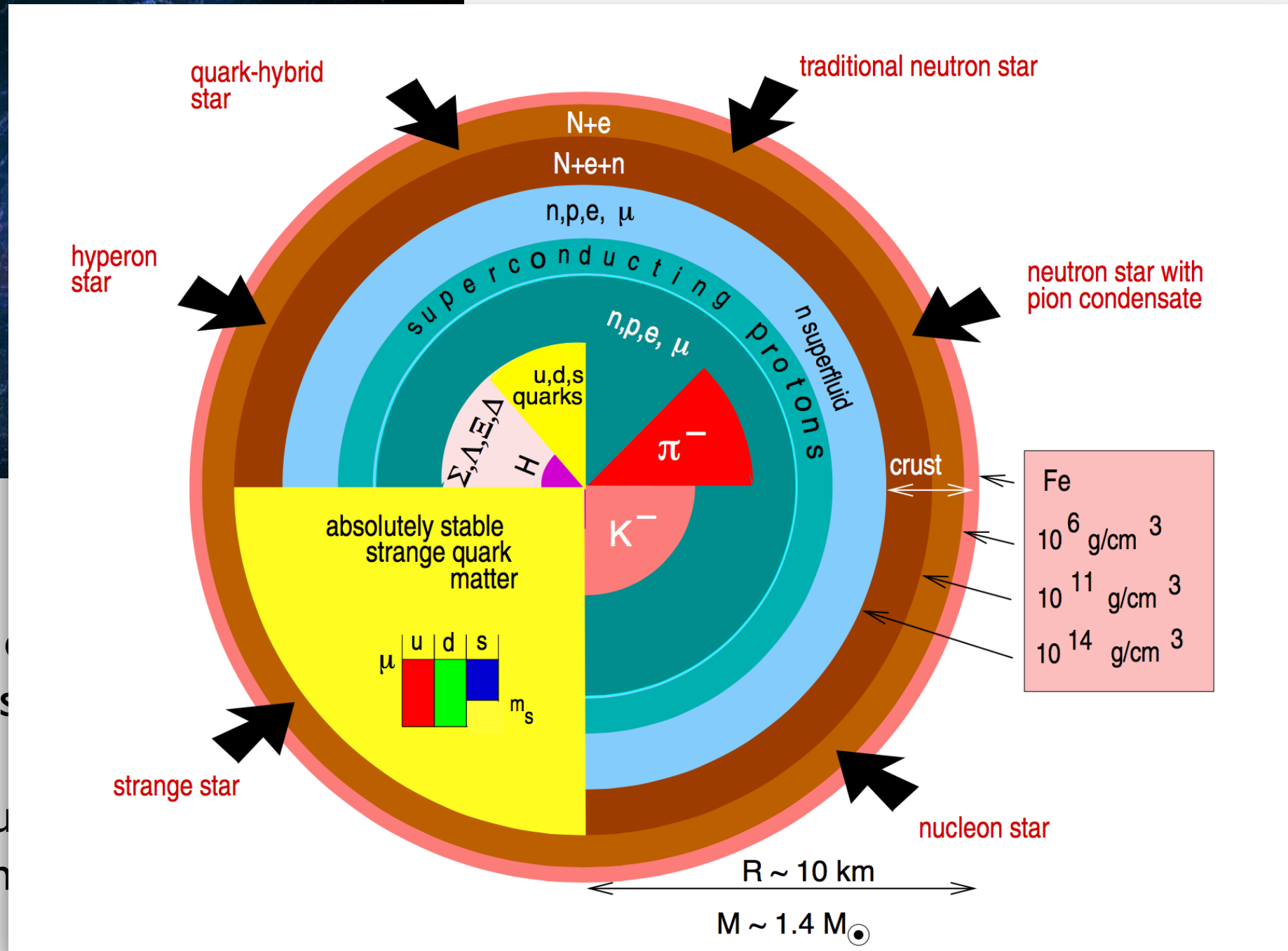
- Masse $\sim 1,4 M_{\odot}$
- $R \sim 10$ km
- Densité $\sim 5 \times 10^{17}$ kg/m³ (i.e. une cuillère à café pèse 10 millions de tonnes)
- Vitesse de libération $\sim 0,5$ x la vitesse de la lumière

- Plus l'étoile à neutrons est massive, plus elle est petite.
- Température de surface $\sim 10^6$ K (rayonnement en X)



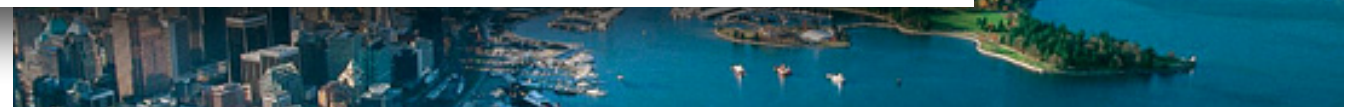
Étoiles à neutrons

- Masse $\sim 1,4 M_{\odot}$

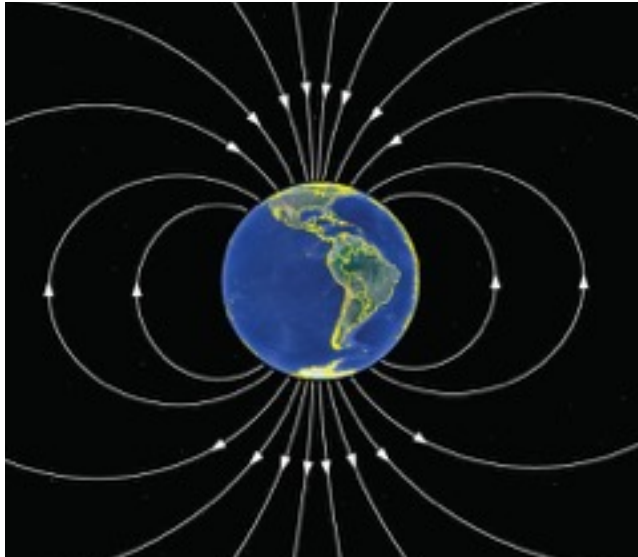


- Plus l'étoile est massive, plus elle est compacte
- Température de surface (rayonnement)

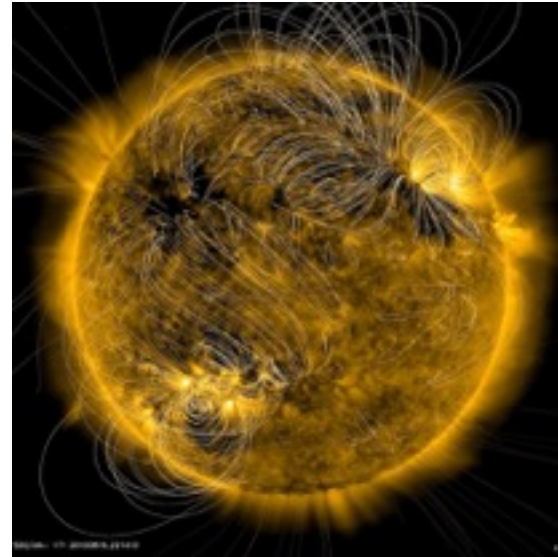
ne cuillère
es)
vitesse de



Le champ magnétique d'une étoile à neutrons



0.5 Gauss



1 Gauss



~ 100 000 Gauss

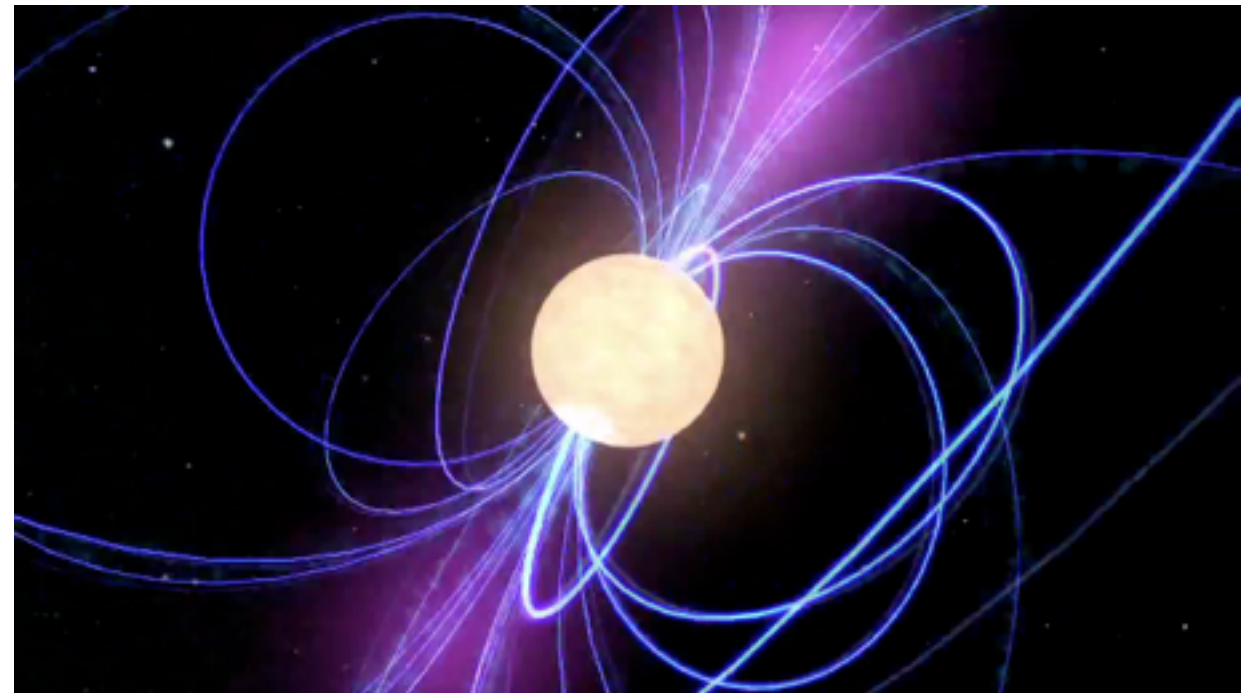
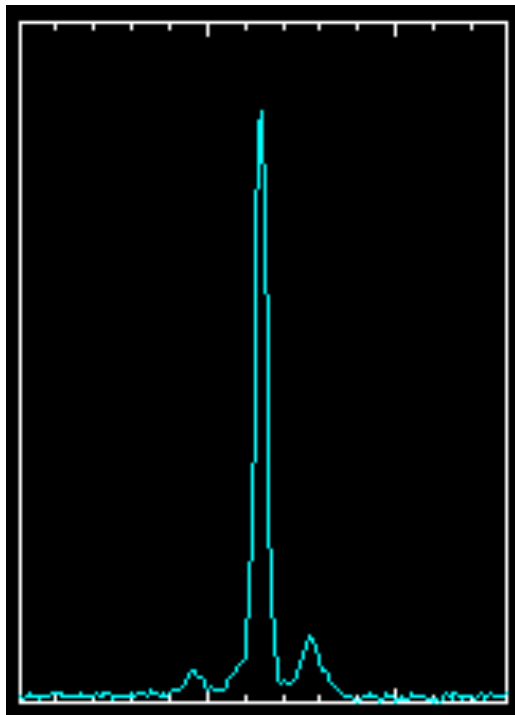


Jusqu'à 10^{15} Gauss
(magnetar)

Observations

Pulsars

- Les pulsars sont des objets astrophysiques émettant un signal temporel périodique (de quelques dizaines de secondes à 1 ms).



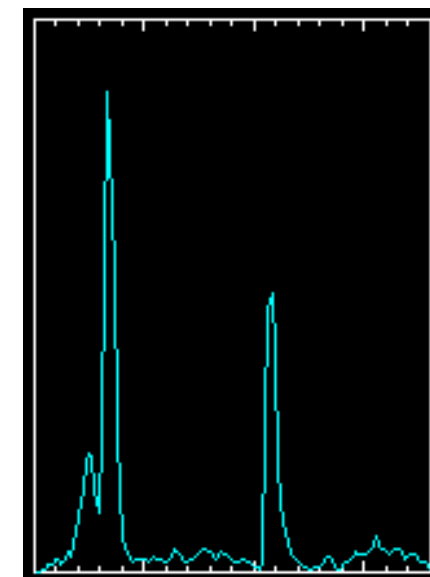
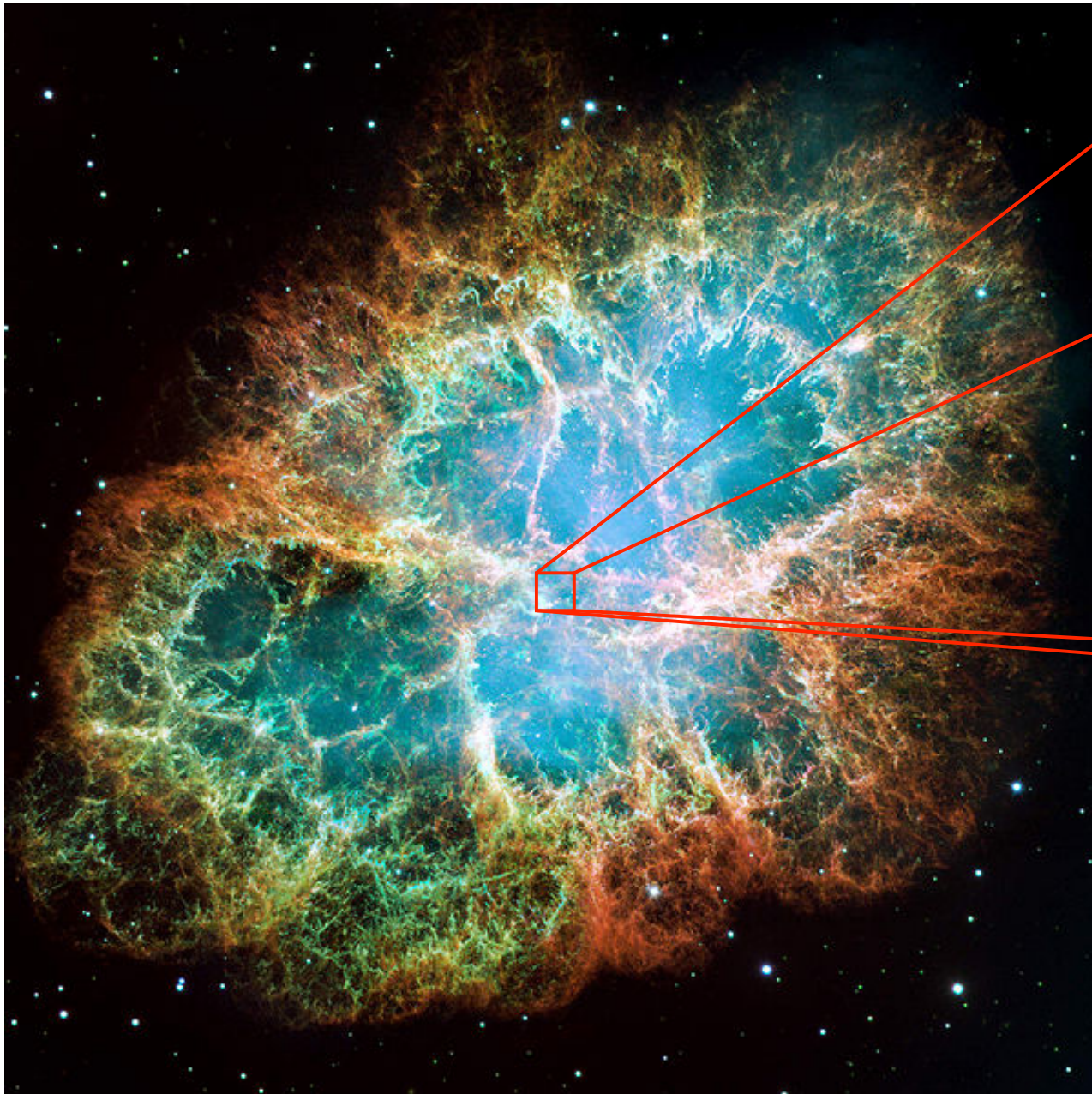
- Lors de leurs découvertes, on a pensé qu'il s'agissait de signaux extra-terrestres.
- Il s'agit en fait d'étoiles à neutrons.
- Pourquoi ?

Pulsars

- Considérons une étoile à neutrons avec un rayon $r \sim 10$ km, alors la circonférence $C = 2 \pi r \sim 60$ km.
- Si la période de rotation $P \sim 1$ ms, alors la vitesse à la surface = $C/P \sim 6 \times 10^4$ km/s $\sim 20\%$ vitesse de la lumière.
- Considérons maintenant une naine blanche avec $r \sim 6400$ km, alors la circonférence $C \sim 40\,000$ km.
- Pour une période $P \sim 1$ ms, vitesse à la surface $\sim 4 \times 10^7$ km/s (~ 100 x vitesse de la lumière !)

Pulsars

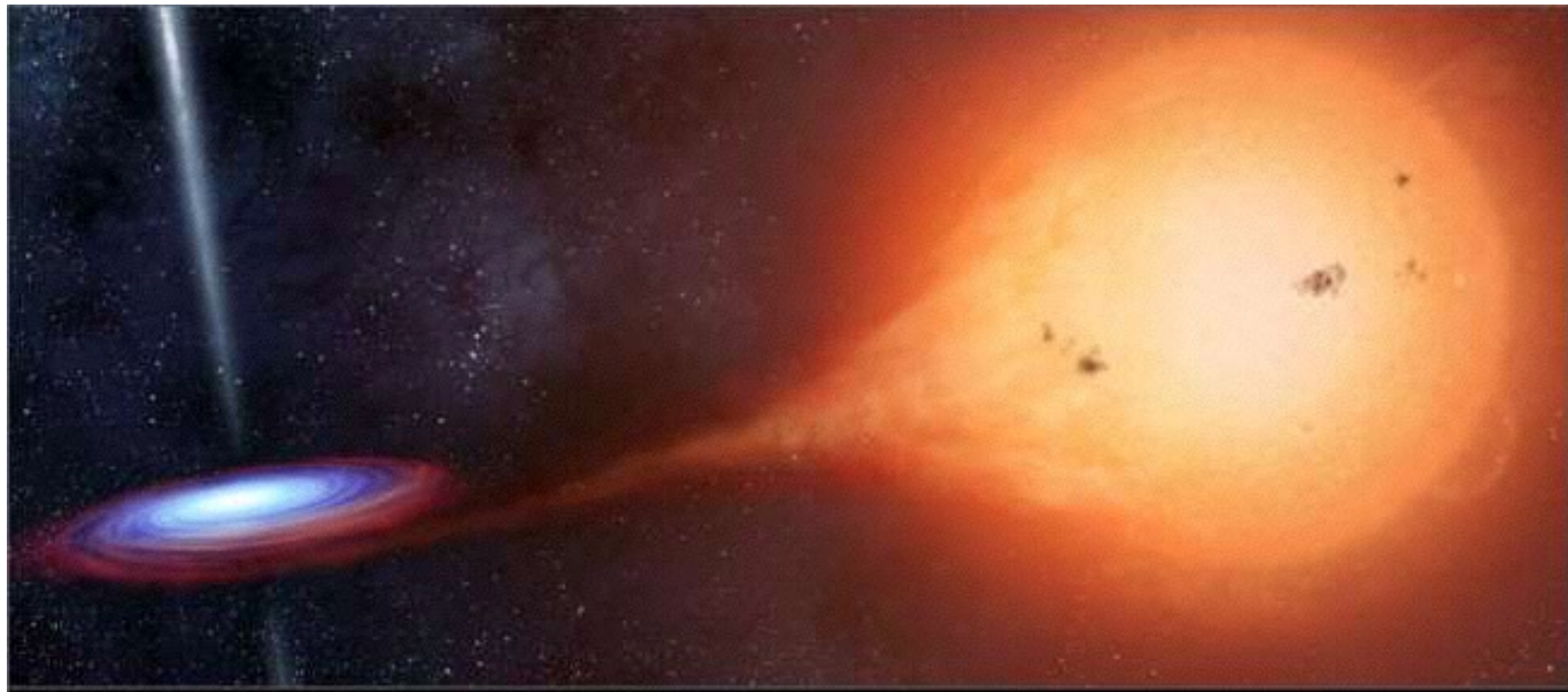
- Association avec des restes de supernovae (ex. : le Crabe – étoile qui a explosé en 1054 et le pulsar découvert en 1968 en radio)



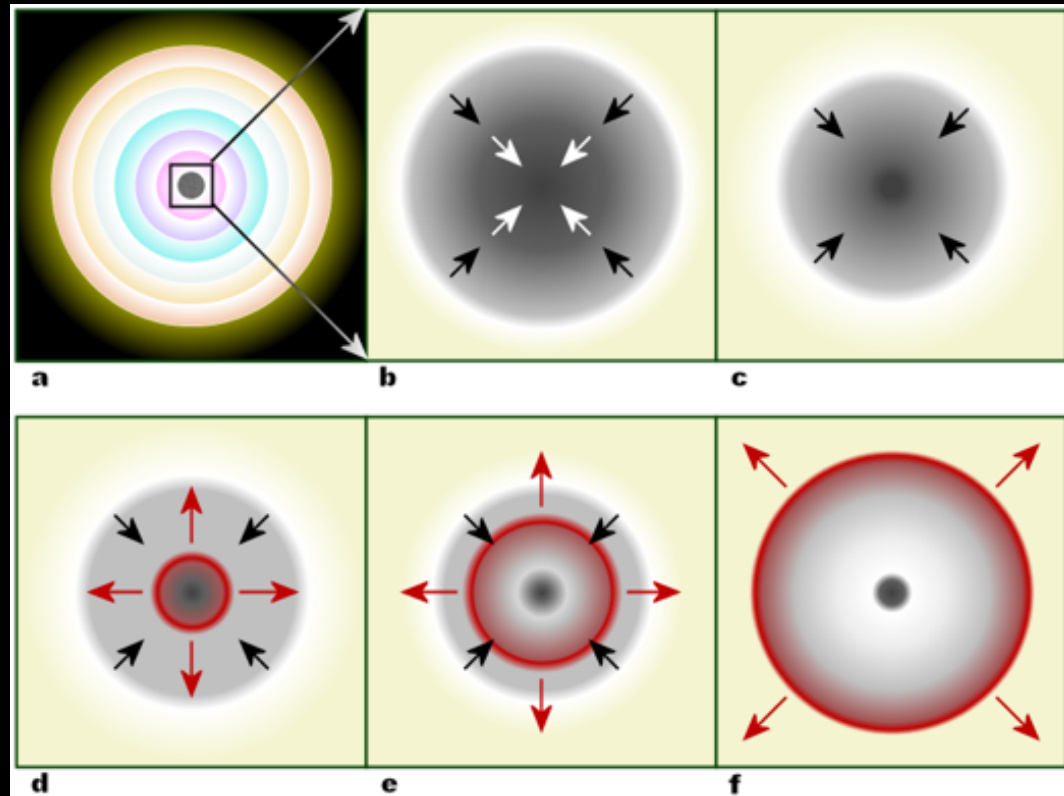
$P = 33 \text{ ms}$

Systemes binaires X

- Systeme binaire étoile + étoile à neutrons
- Formation d'un disque d'accrétion
- Emission de rayons X
- Eruptions régulières du disque
- Formation de jets



Étoiles de plus de $20 M_{\odot}$

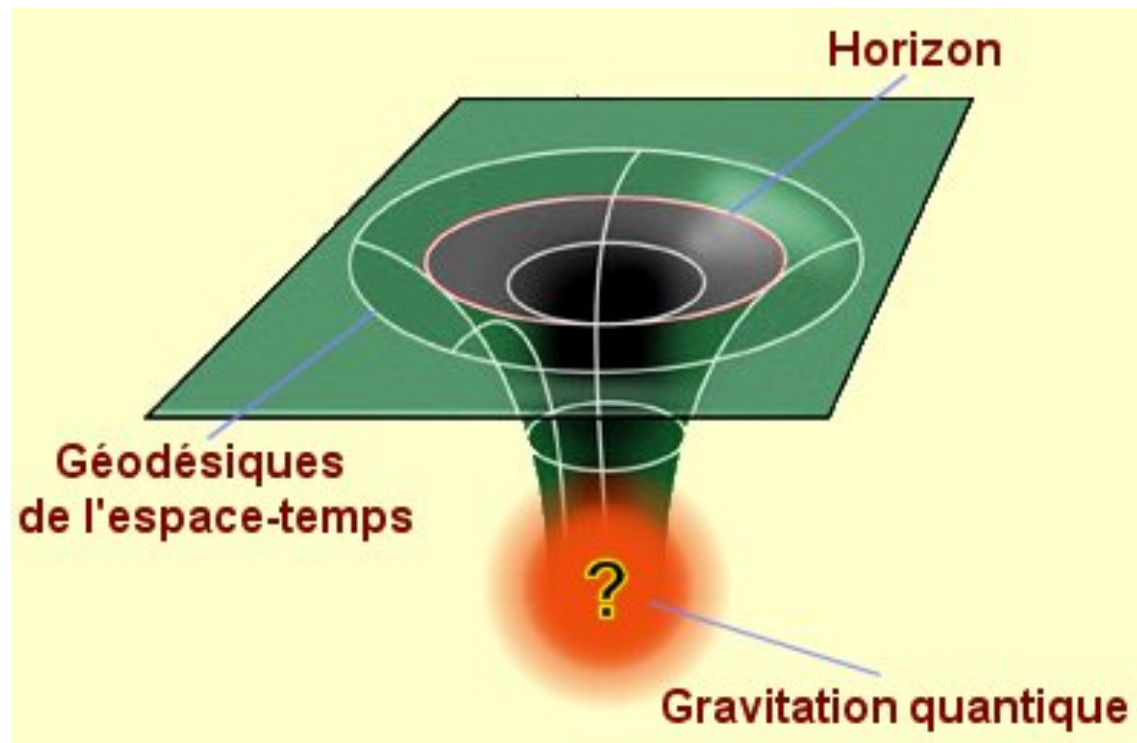


- L'onde choc n'est pas suffisamment puissante pour expulser toute la matière.
- Une partie retombe sur le coeur de neutrons.
- Quand sa masse dépasse $\sim 3 M_{\odot}$, le coeur s'effondre en trou noir.
- Le reste de l'étoile explose en supernova (ou pas...)

Autre possibilité



Trous noirs



- $M > 3 M_{\odot}$
- Densité: inconnue
- Vitesse de libération $> c$

Horizon de événements

$$R_s = \frac{2GM}{c^2} \sim 9 \text{ km} \left(\frac{M}{3M_{\odot}} \right)$$

- **Théorème: un trou noir n'a pas de cheveux ("no hair" theorem)**

Une trou noir est complètement décrit par seulement 2 paramètres: sa masse et son spin !

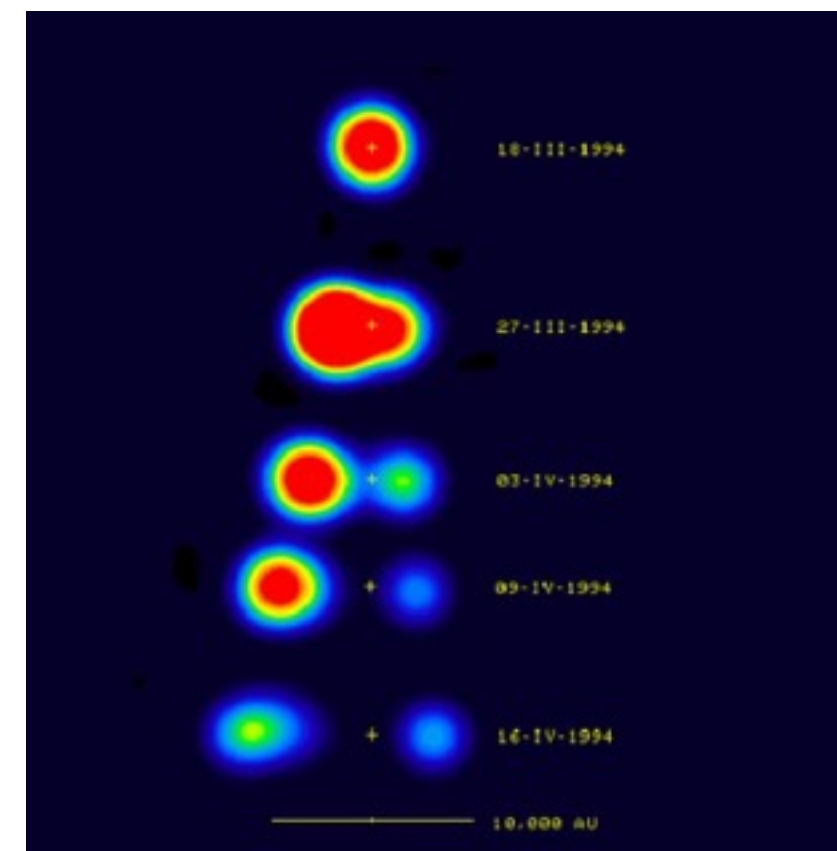
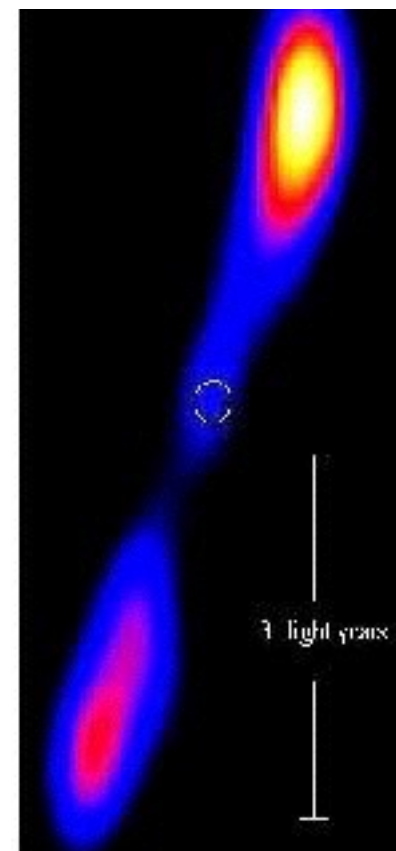
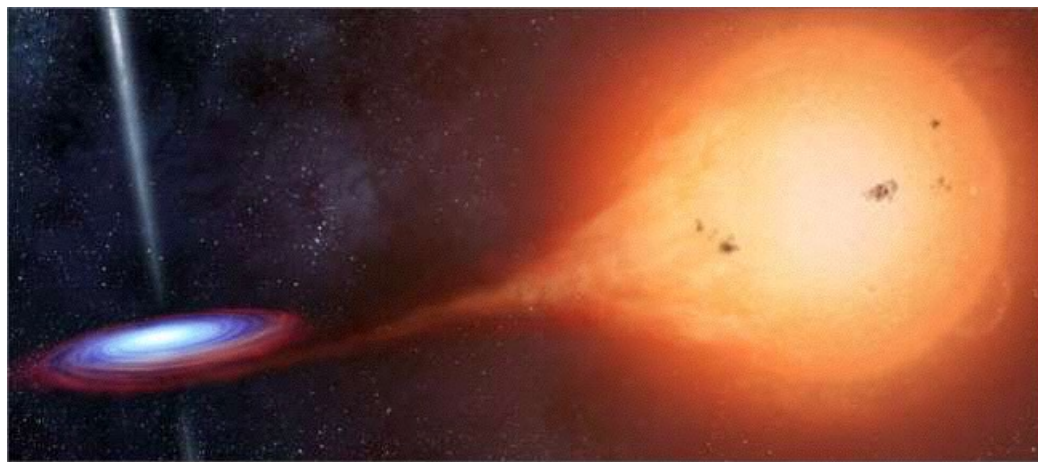
Observations

Systemes binaires X

- Systeme binaire étoile + trou noir
- Formation d'un disque d'accrétion
- Emission de rayons X
- Eruptions régulières du disque

- Formation de jets (vitesse proche de c)

Microquasars



Trous noirs supermassifs

1 million à 10 milliards de masse solaire



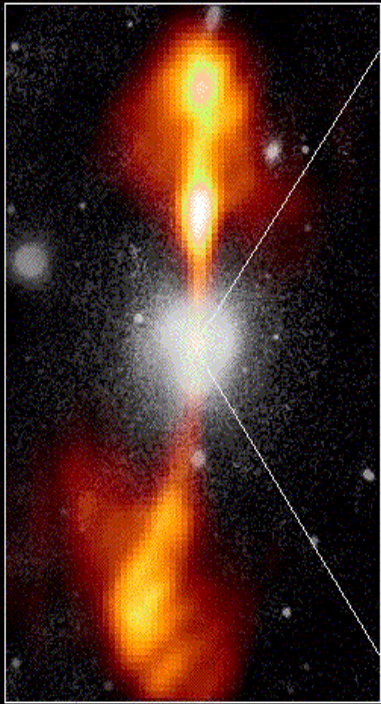
Centaurus A

- Au centre de la plupart (toutes ?) des galaxies.
- Formation toujours mal comprise

Galaxie à noyau actif

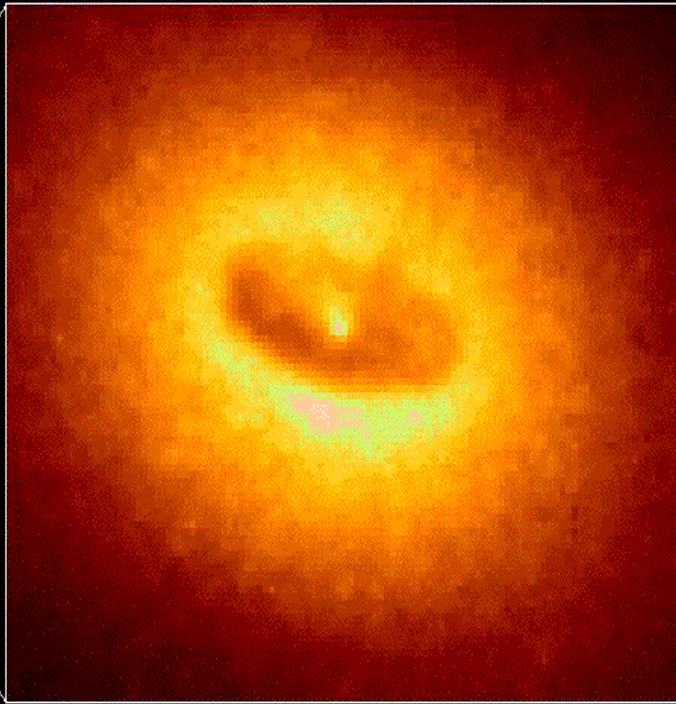
Noyaux actifs de galaxies

Ground-Based Optical/Radio Image

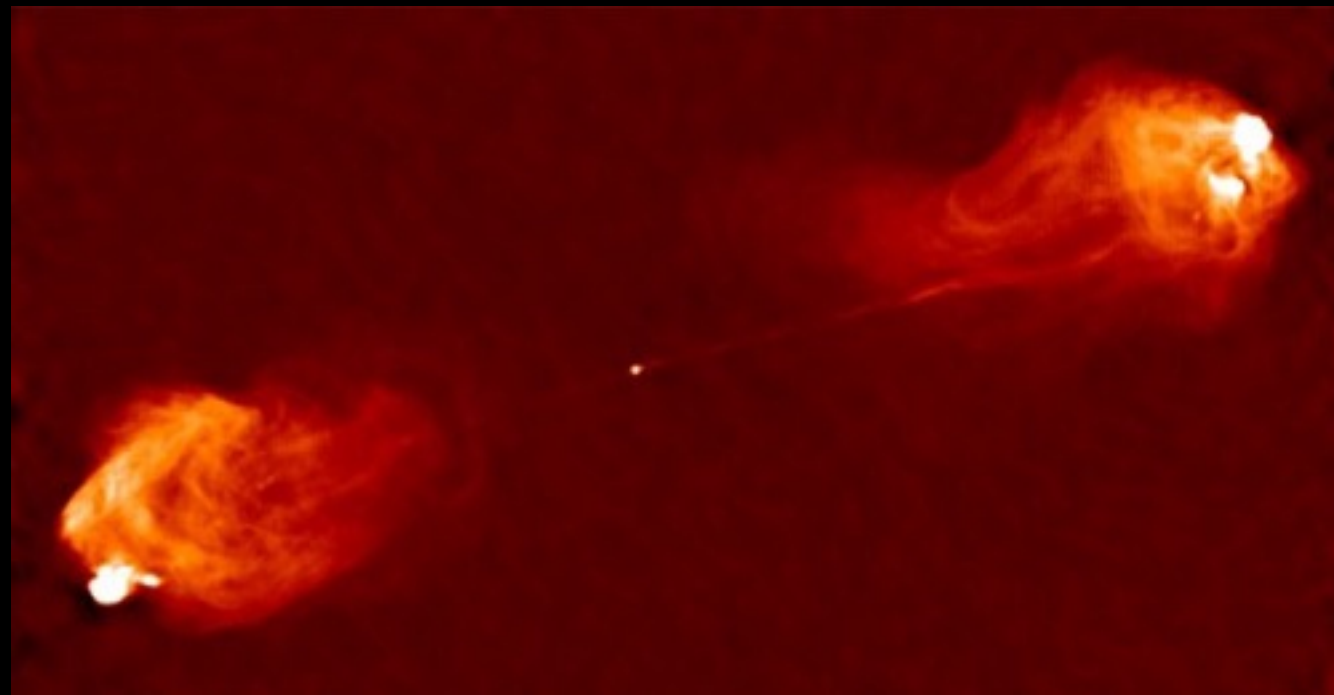
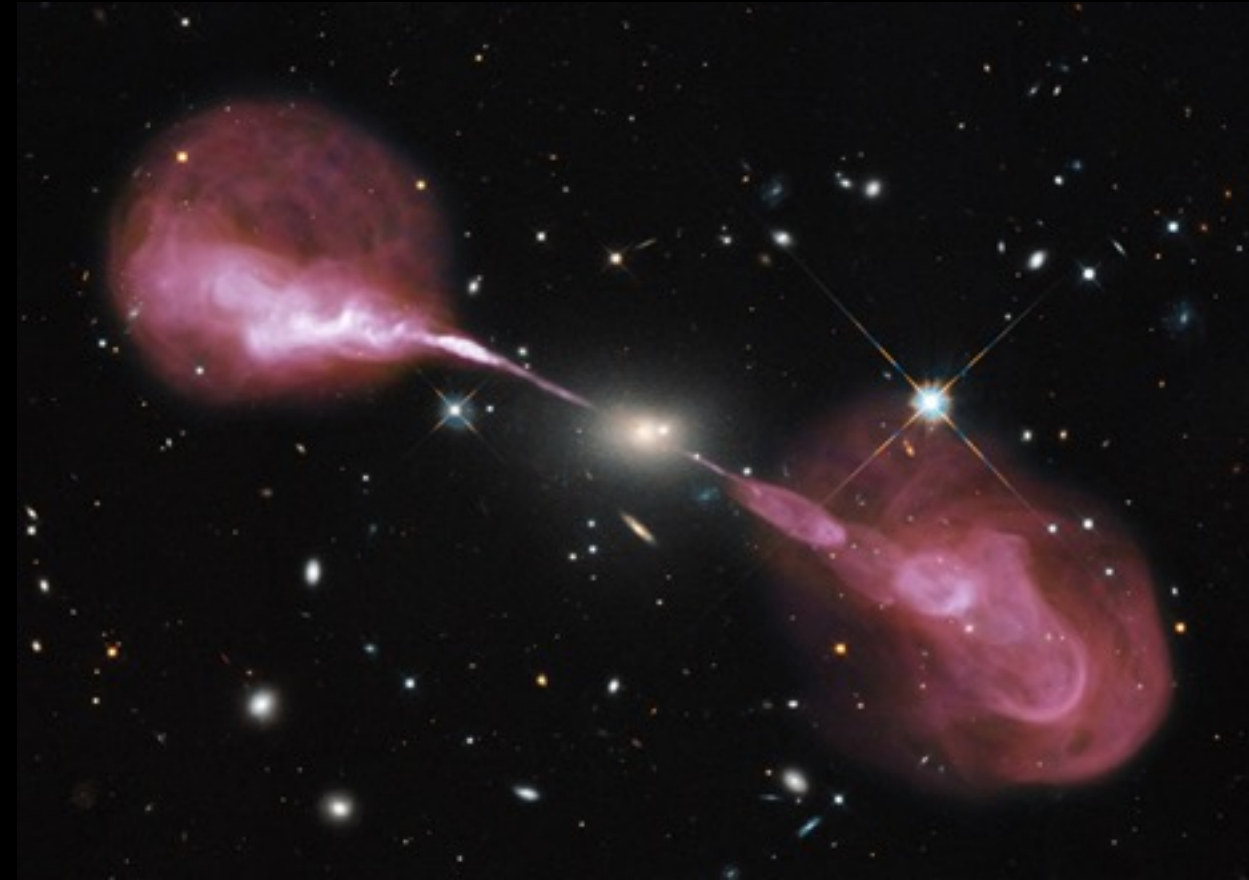


380 Arc Seconds
88,000 LIGHTYEARS

HST Image of a Gas and Dust Disk

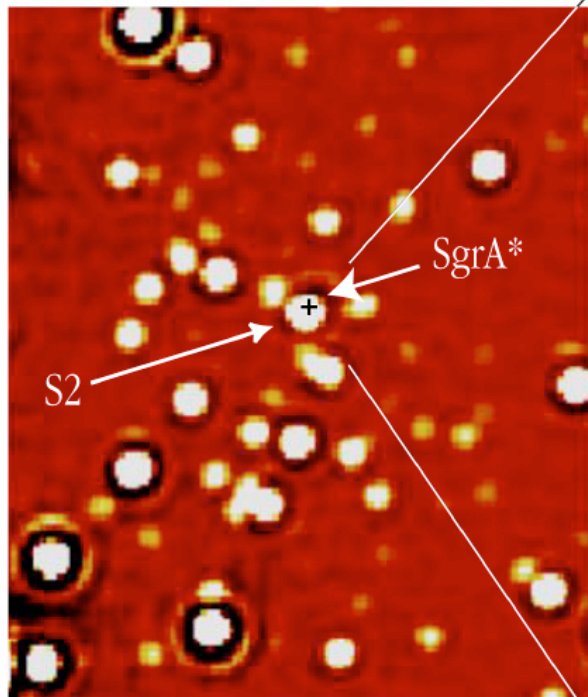


17 Arc Seconds
400 LIGHTYEARS

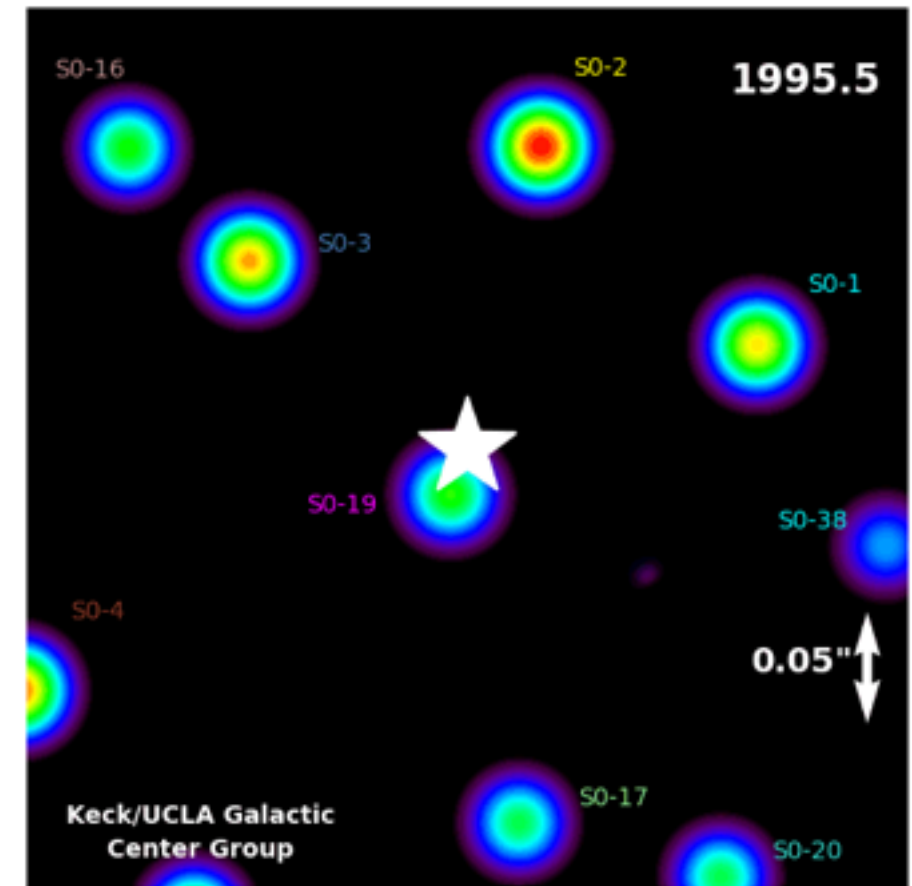
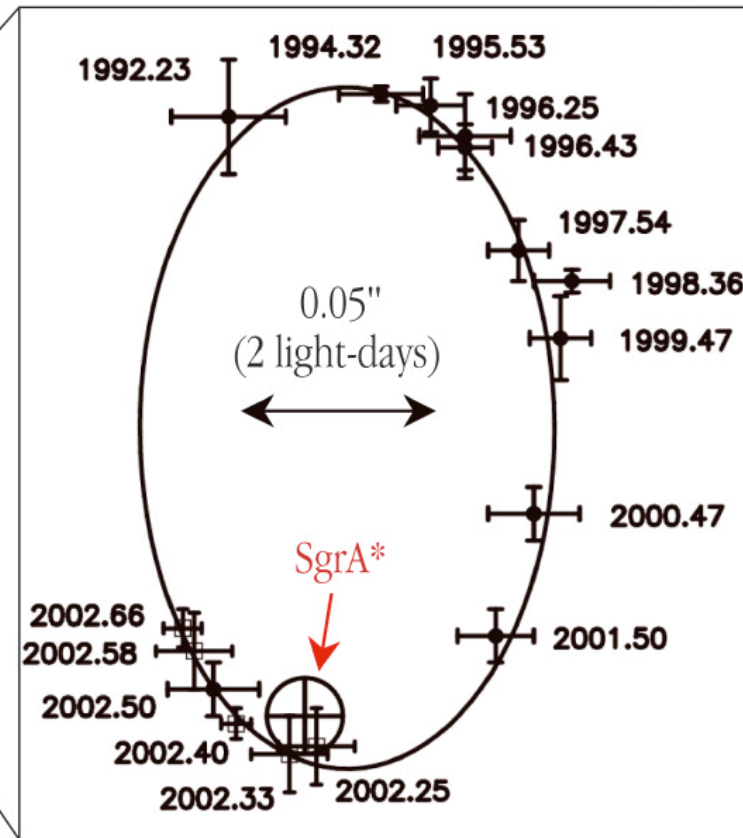


Notre trou noir supermassif: SgrA*

NACO May 2002



S2 Orbit around SgrA*



The Motion of a Star around the Central Black Hole in the Milky Way



ESO PR Photo 23c/02 (9 October 2002)

© European Southern Observatory

$M \sim 4 \text{ millions } M_{\odot}$

Conclusions

- Laboratoire pour étudier la physique extrême (champ magnétique, gravitationnel, matière ultra-dense).
- Permettent de tester les limites de nos théories.
- Responsable des phénomènes violents et énergétiques de l'univers (e.g. sursauts gamma).
- Comprendre la formation et l'évolution des galaxies via la croissance des trous noirs supermassifs