

# ***ASTROPHYSIQUE***

## **13 – LA FIN DES ÉTOILES**



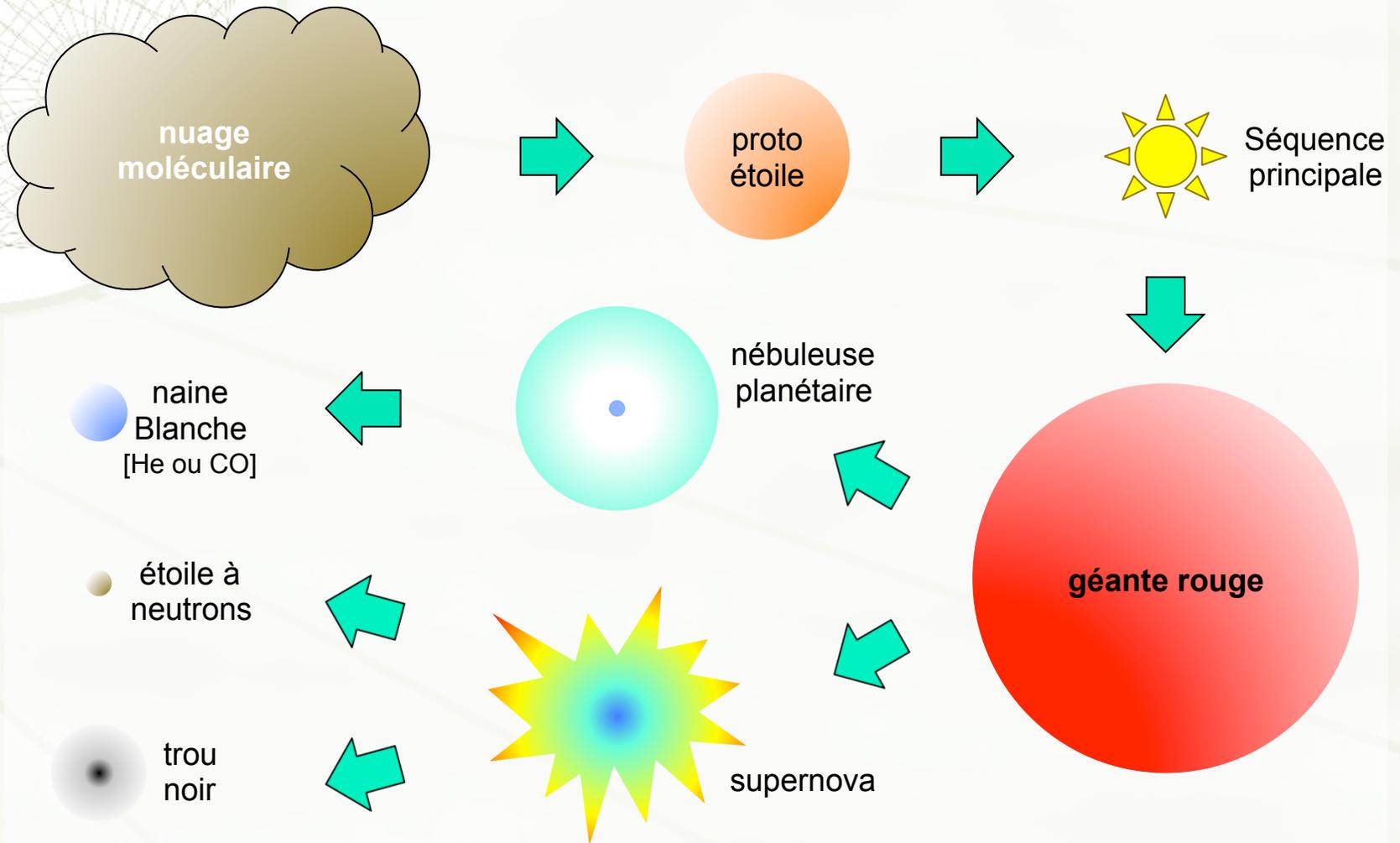
Alain Bouquet

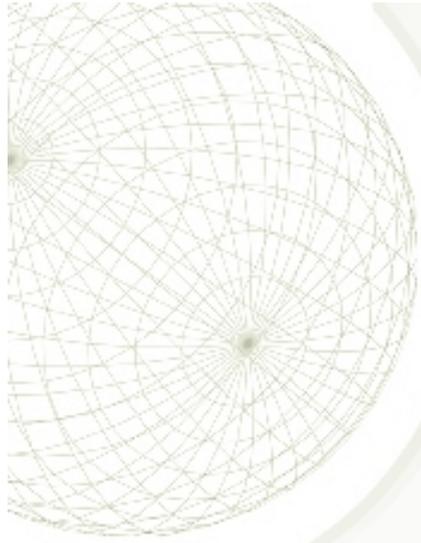
Laboratoire AstroParticule & Cosmologie

Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA



# L'ÉVOLUTION DES ÉTOILES





# **LA FIN DES PETITES ÉTOILES**

## UNE QUESTION DE MASSE

- Étoiles de masse  $< 0,5 M_{\odot}$ 
  - l'étoile est entièrement convective (→ brassage)
  - la fusion de l'hydrogène prend des dizaines de milliards d'années → toujours SP
  - *la fusion de l'hélium n'est jamais possible*
- Étoiles de  $0,5$  à  $8 M_{\odot}$  (environ!)
  - fusion de l'hélium en carbone et oxygène dans le cœur
  - fusion du carbone impossible → cœur C-O et enveloppe He et H
  - restructuration → contraction du cœur C-O et soufflage de l'enveloppe
  - → **nébuleuse planétaire et naine blanche C-O**
- Étoiles de  $8$  à  $10 M_{\odot}$ 
  - fusion du carbone en néon et magnésium possible → naine blanche Ne-Mg
  - mais stabilité du cœur marginale → **supernova** par effondrement du cœur (SN type II)
- Étoile  $> 10 M_{\odot}$ 
  - fusion du néon en fer (via silicium, soufre, calcium...)
  - mais cœur instable → supernova par effondrement du cœur (SN type II)
- ***Le stade de « naine blanche » est le stade ultime de 97% des étoiles !***

# NÉBULEUSE « PLANÉTAIRE » PUIS NAINE BLANCHE



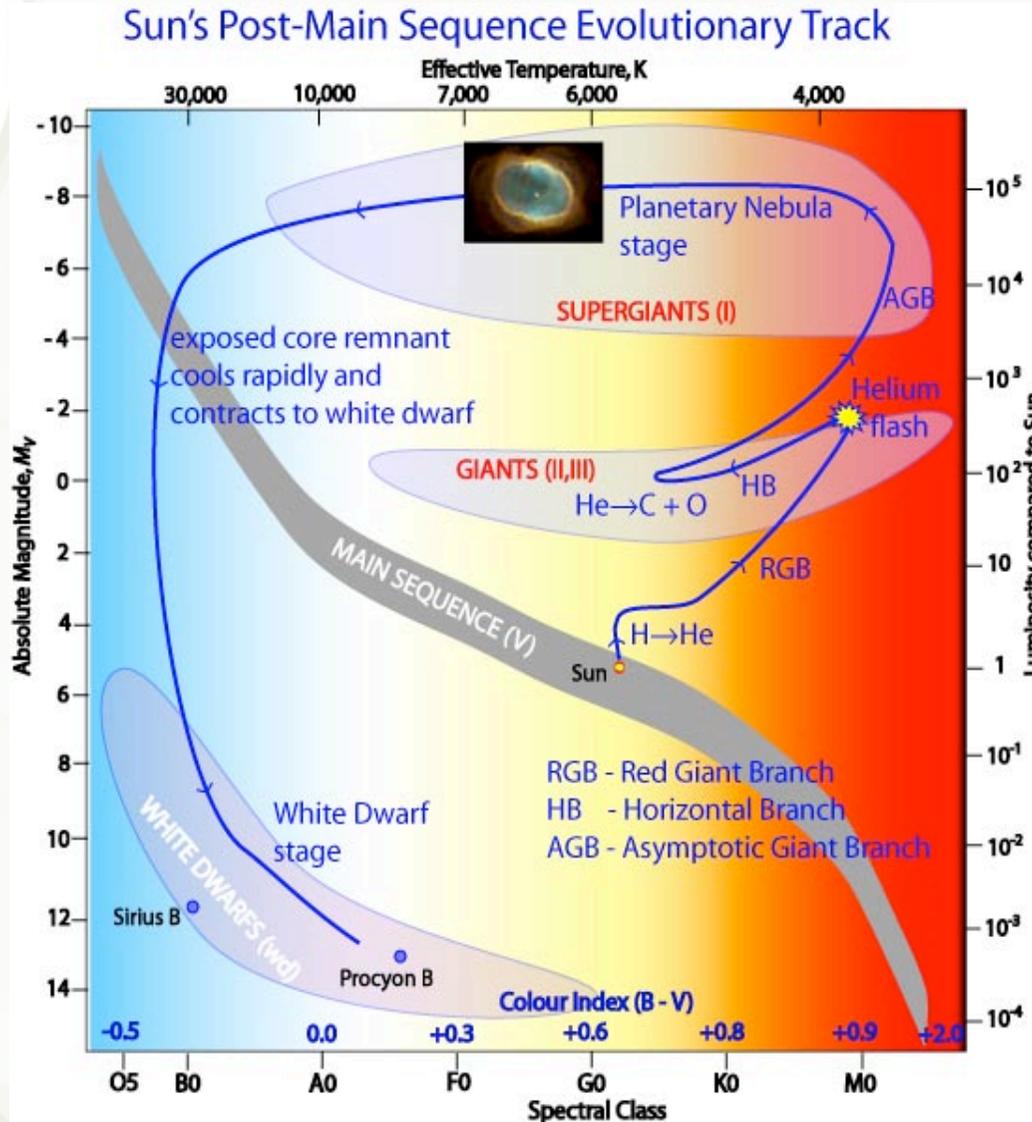
Nébuleuse planétaire  
Couches externes éjectées  
Cœur C-O apparaissant



Contraction du cœur  
Luminosité décroissante



Stabilisation du cœur par  
la pression de Fermi  
Refroidissement progressif



Branche asymptotique  
des géantes  
*Fusion He en couche*  
(+ *fusion H en couche*)



Branche horizontale  
des géantes  
*Fusion He au cœur*  
(+ *fusion H en couche*)



Branche des géantes  
*Fusion H en couche*



Séquence principale  
*Fusion H au cœur*



# NÉBULEUSE PLANÉTAIRE

- Géante rouge → naine blanche
- ↗ contraction très importante du cœur (↘ de  $100 R_{\odot}$  à  $1/100 R_{\odot}$ )
- ↗ échauffement très important
  - $T \sim 10$  MK dans toute l'épaisseur (conduction de chaleur par les électrons)
  - $T \sim 30\,000$  à  $100\,000$  K en surface → émission **ultraviolette**
- L'enveloppe (plusieurs  $M_{\odot}$  parfois) est soufflée par la pression de rayonnement
  - vitesse d'éjection  $\sim 20$  à  $30$  km/s
  - ionisée par les UV
  - → **raies en émission**
  - *nébulium* en fait [OIII]

- Durée de vie courte ( $\sim 10\,000$  ans) avant de se disperser dans le milieu interstellaire ⇒ seulement  $\sim 1500$  connues



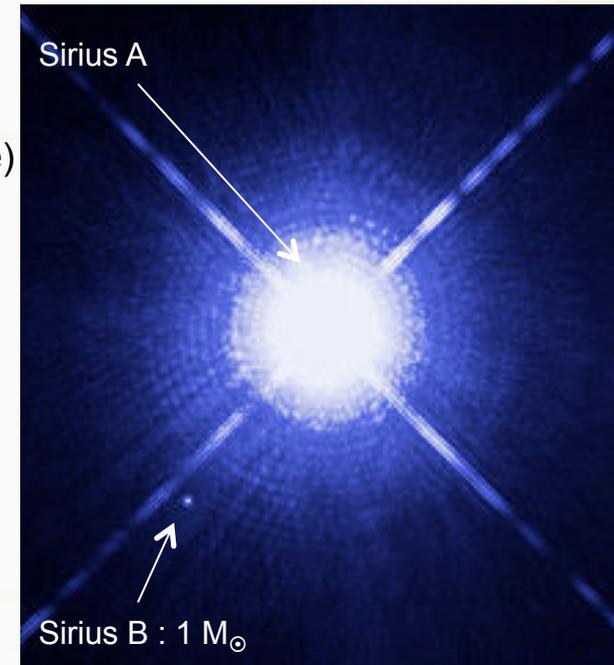
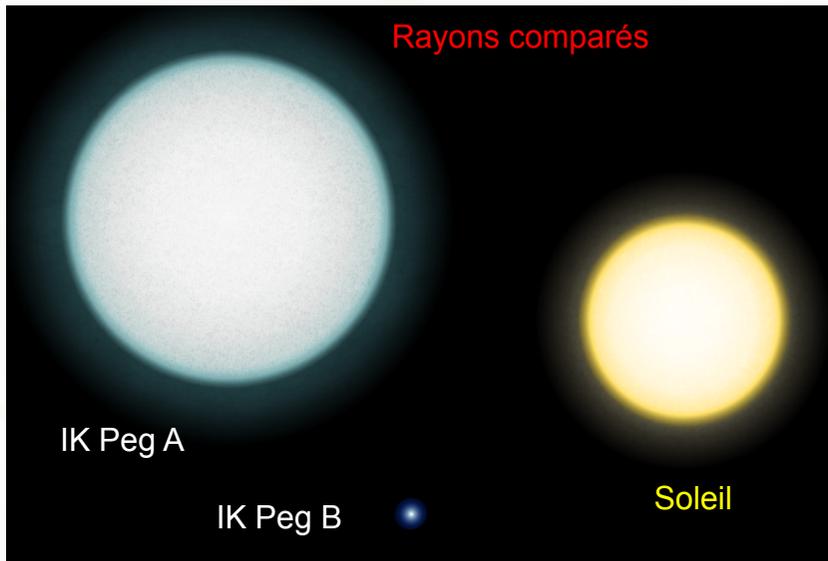
- Nébuleuse planétaire de l'Hélice (NGC 7293, à  $\sim 700$  al de la Terre)

## LA NÉBULEUSE DE L'ŒIL DU CHAT



# NAINES BLANCHES

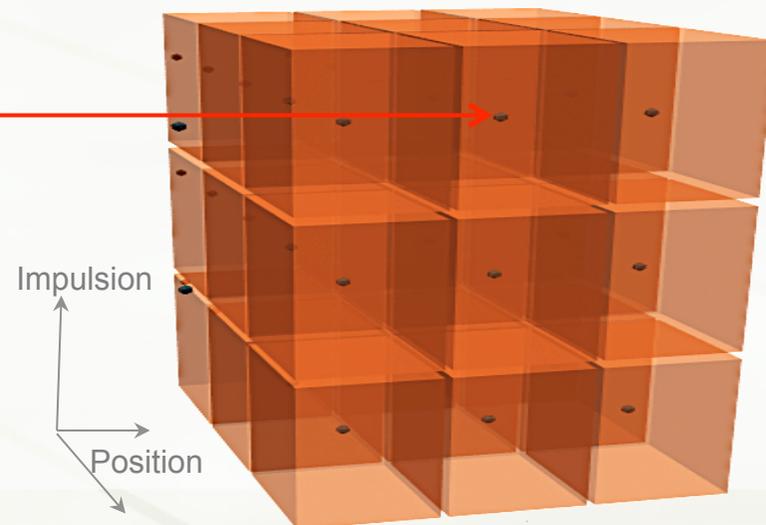
- Premiers exemples connus : 40 Eri B et Sirius B
- Classe particulière d'étoiles (Russell, Pickering 1910)
  - Type spectral B ou F (couleur blanc-bleuté)
  - Luminosité très faible (1/100 à 1/10000 luminosité solaire)
- Émission thermique  $L = 4\pi R^2 \sigma T^4$  ☞ rayon R  
⇒ TRÈS petit rayon (~ Terre)



- Masses de 0,2 à 1,3 M<sub>⊙</sub>  
⇒ densités ~ 1 tonne / cm<sup>3</sup>

# PRINCIPE DE PAULI ET GAZ DE FERMIONS

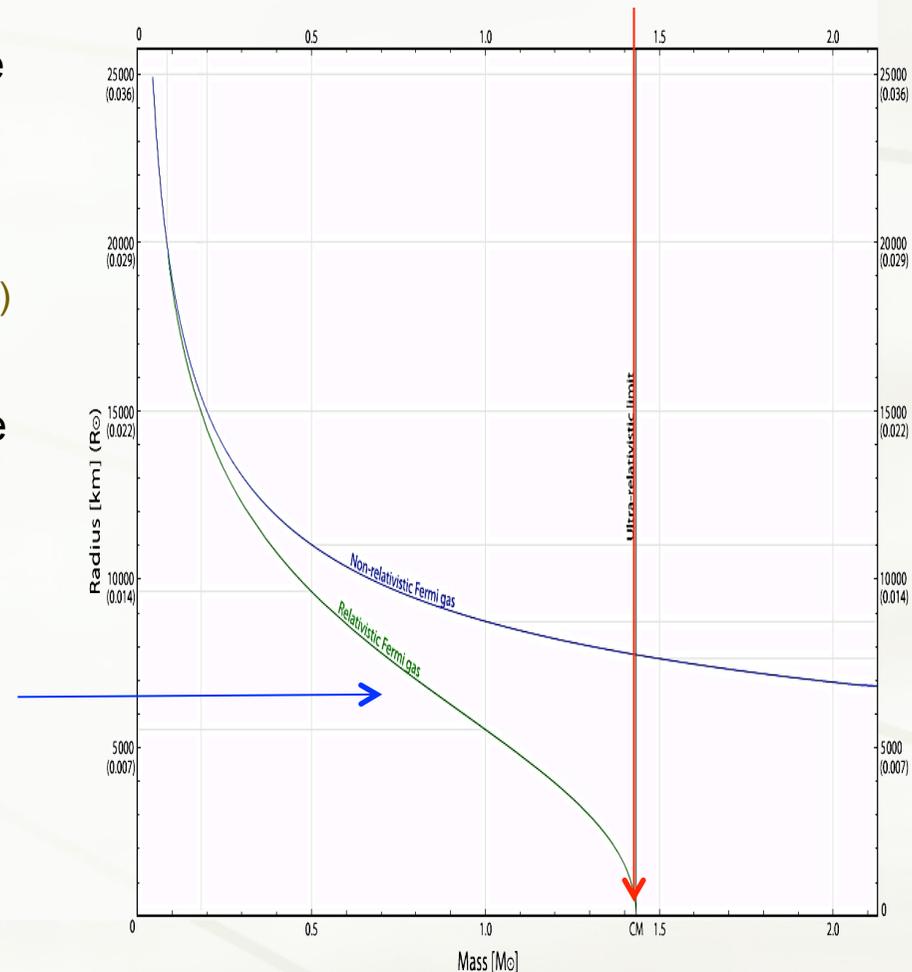
- Deux fermions ne peuvent pas être dans le même état quantique
  - fermions = électrons, protons, neutrons
- Explication de la structure atomique
  - les électrons ne peuvent pas tous être dans l'état d'énergie minimale
  - $\Rightarrow$  ils occupent des états d'énergie de plus en plus haute
  - le dernier niveau occupé détermine les propriétés chimiques  $\Rightarrow$  périodicité de ces propriétés
- Gaz de Fermi (par exemple les électrons d'un plasma)
  - état classique = point dans l'espace des phases {position, impulsion, spin}
  - inégalité de Heisenberg  $\Delta x \Delta p > \hbar/2$ 
    - position définie à  $\Delta x$  près
    - impulsion définie à  $\Delta p$  près
  - $\Rightarrow$  **cellules** de taille finie ( $\sim \hbar$ ) dans l'espace des phases
  - $\Rightarrow$  nombre maximal de fermions dans un volume donné
  - $\Leftrightarrow$  les fermions s'opposent à être comprimés au-delà d'une pression limite



# MASSE DE CHANDRASEKHAR

- La pression de Fermi est *toujours* présente
- Mais elle est négligeable pour la matière dans les conditions usuelles de densité et de température
  - $P_{\text{gaz parfait}} = n k T$
  - $P_{\text{Fermi}} = K n^\gamma$ 
    - $\gamma = 5/3$  (gaz non-relativiste)
    - $\gamma = 4/3$  (gaz relativiste)
- $\Rightarrow$  la pression de Fermi domine à haute densité
- *ce qui est le cas des naines blanches*
- Augmenter la masse diminue le rayon de l'étoile
  - la force de gravitation augmente
  - donc la pression, donc **plus vite encore** la densité

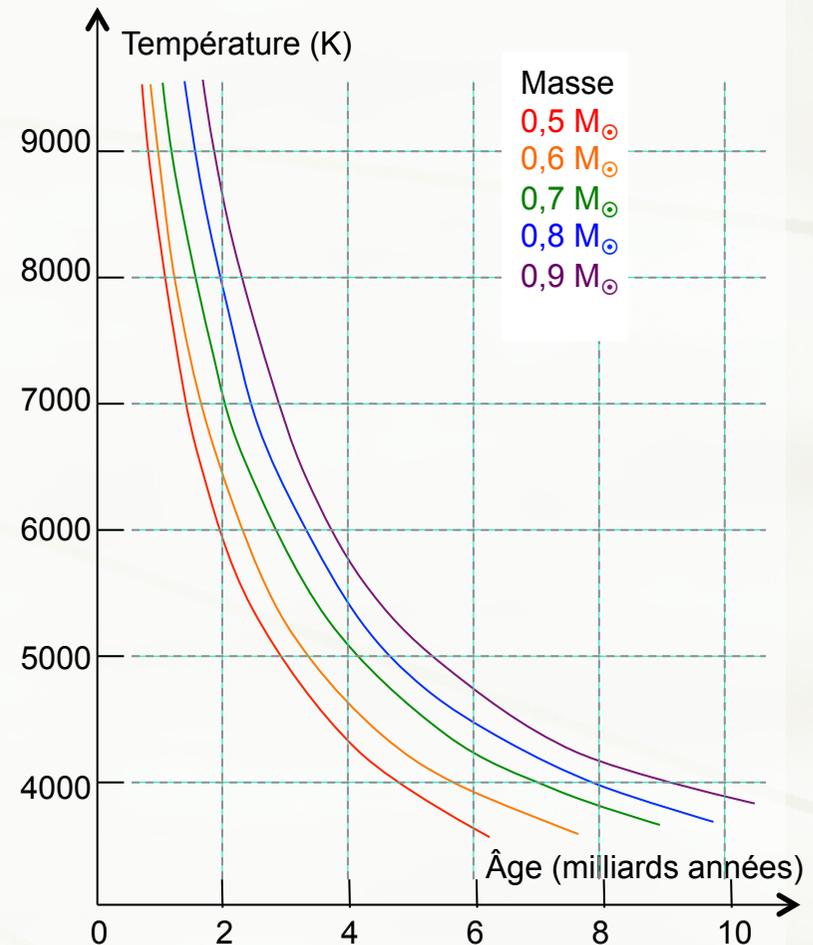
- $\Rightarrow$  il existe une masse maximale, la **masse de Chandrasekhar**  $\sim 1,4 M_\odot$



# REFROIDISSEMENT DES NAINES BLANCHES

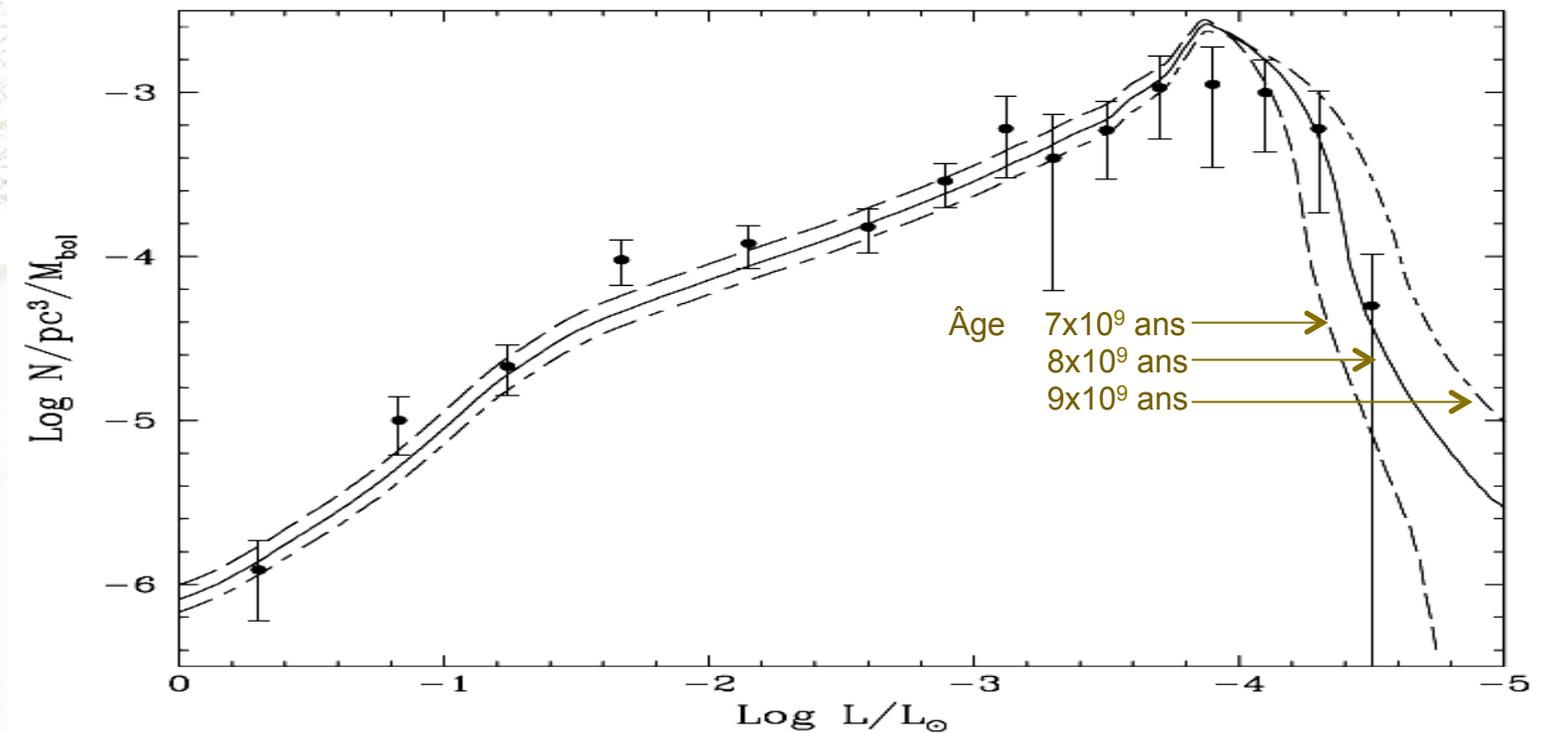
- Spectroscopie : raies de l'hydrogène ou de l'hélium
  - interprétation : atmosphère de l'étoile ne représentant que 1% de la masse (séparation gravitationnelle)
  - cœur de carbone et d'oxygène
- **Aucune fusion n'est plus possible**  
⇒ la seule source éventuelle d'énergie est la contraction gravitationnelle
- Contraction bloquée par la *pression de Fermi* des électrons dégénérés  
⇒ l'étoile ne peut que se refroidir...  
...lentement !

- Vitesse de refroidissement

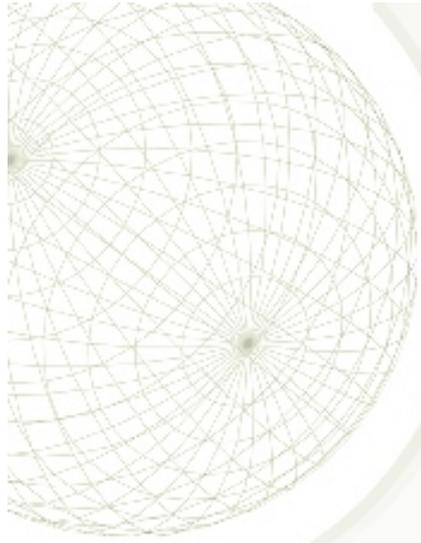


# ÂGE DU DISQUE DE LA VOIE LACTÉE

- Fonction de luminosité



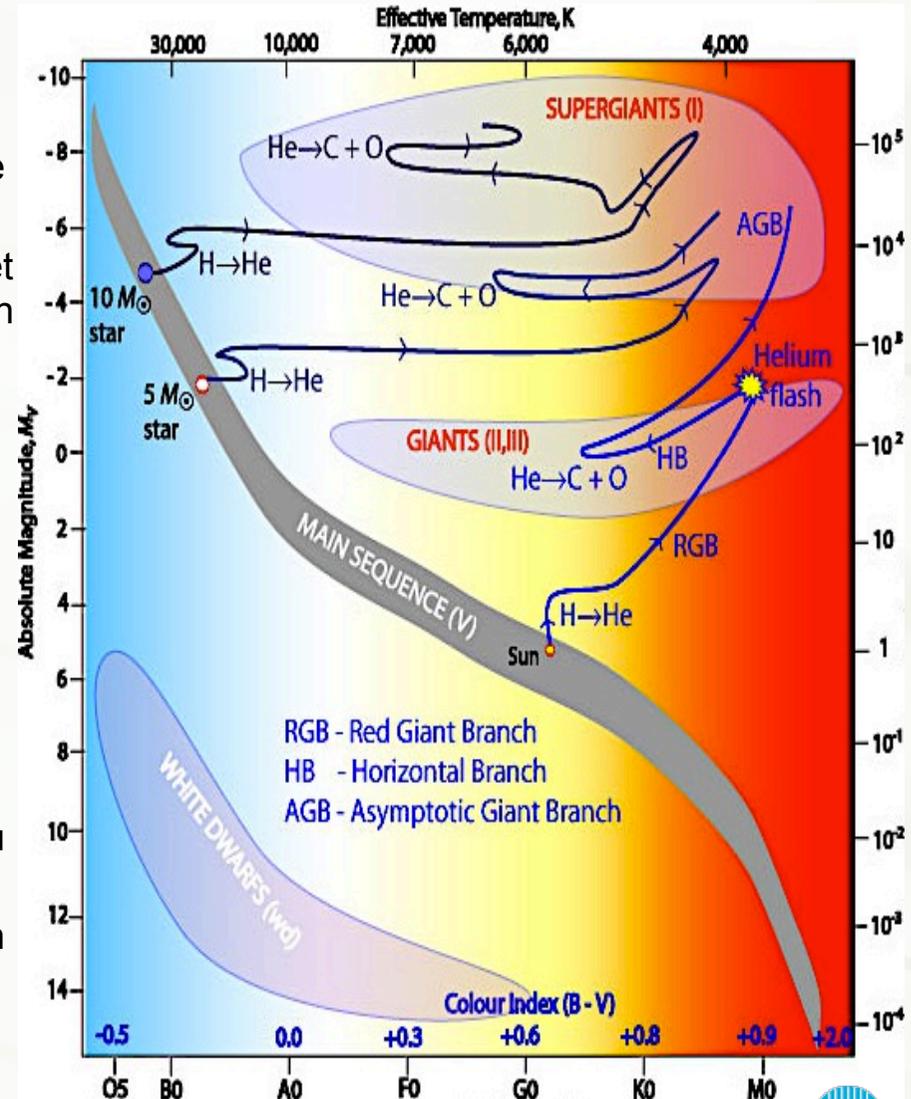
- $\Rightarrow$  âge du *disque* galactique  $8 \times 10^9$  ans (+ temps de formation de la naine blanche)



# LA FIN DES ÉTOILES MASSIVES

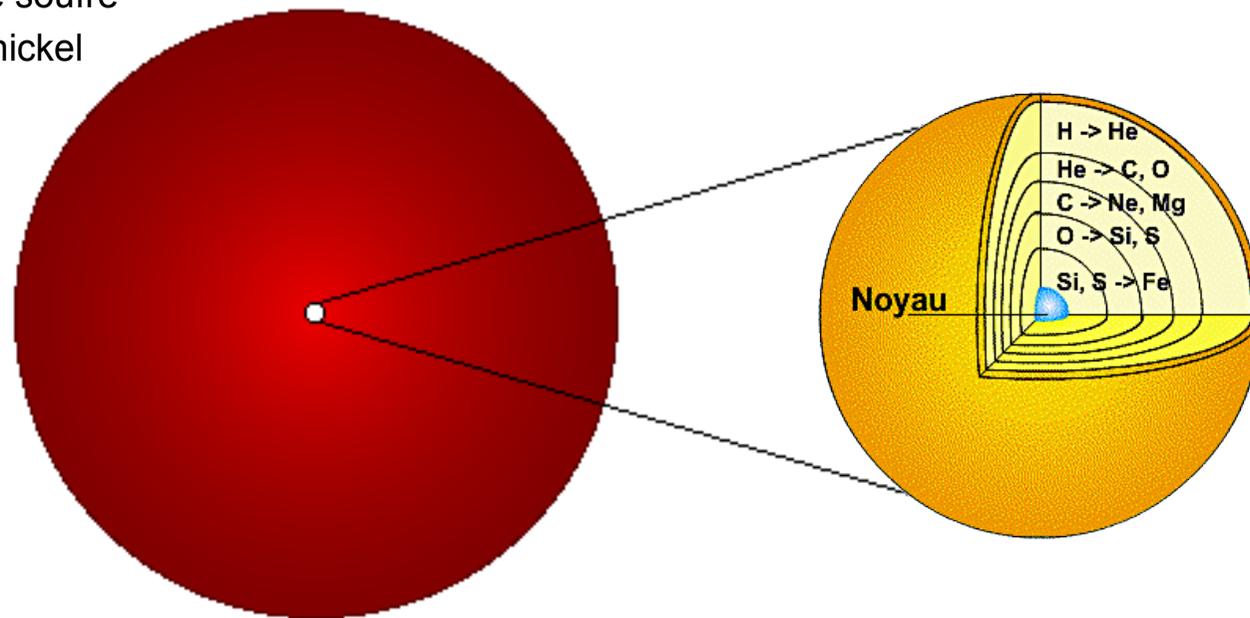
# LA FIN D'UNE GÉANTE

- Étapes principales d'une étoile
  - **Séquence principale** : fusion de l'hydrogène au cœur
  - **Branche des géantes rouges** : contraction et fusion de l'hydrogène en couche autour d'un cœur d'hélium inerte
  - **Branche horizontale des géantes** : contraction et fusion de l'hélium au cœur et de l'hydrogène en couche
  - **Branche asymptotique des géantes** : contraction et fusion de l'hélium dans une couche autour d'un cœur carbone-oxygène inerte
  
- Et ensuite ?
  - Réarrangement de structure (contraction du cœur et dilatation de l'enveloppe)
  - Soit la température atteinte permet la fusion du carbone → nouvel équilibre
  - Soit non → contraction gravitationnelle



# LA FIN DES ÉTOILES MASSIVES

- Une étoile massive aboutit à une structure en couches concentriques
  - Selon la masse, le noyau est formé
    - de carbone et d'oxygène,
    - de néon et de magnésium
    - de silicium et de soufre
    - ou de fer et de nickel

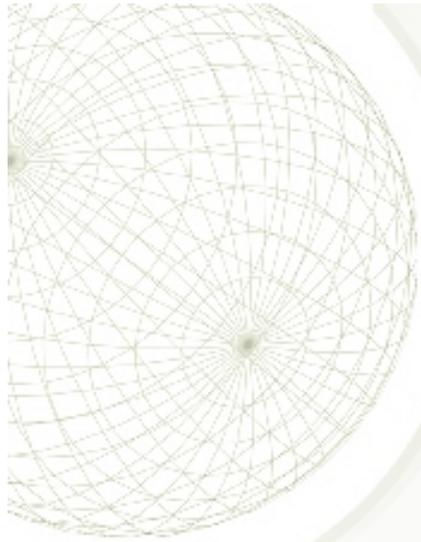


- Mais il arrive un moment où aucune fusion n'est plus possible

# L'EFFONDREMENT D'UNE GÉANTE

- Plus de fusion possible et température du cœur  $\sim 10$  milliards de kelvins
- Les photons  $\gamma$  peuvent photodissocier le fer en protons et neutrons
- Cela absorbe de l'énergie  $\rightarrow$  la pression chute
- Le cœur se contracte en quelques secondes
- La réaction  $e^- + p^+ \rightarrow n^0 + \nu_e$  devient énergétiquement possible
- Il n'y a presque plus d'électrons  $\rightarrow$  plus de pression de Fermi des électrons
- Flux intense de neutrons  $\rightarrow$  capture possible par les noyaux survivants
- La pression de Fermi des neutrons domine au delà de 1 000 milliards de kelvins
- Elle arrête alors l'effondrement du cœur de neutrons mais pas celui de l'enveloppe
- Celle-ci chute sur le cœur désormais solide et impénétrable
- L'enveloppe rebondit  $\rightarrow$  onde choc dispersant la matière dans l'espace
- Énergie libérée  $\sim 10^{46}$  J (= 500 milliards d'années de  $L_\odot$ )
  - 99% sous forme de neutrinos
  - 1% sous forme de lumière  $\rightarrow L > 10^9 L_\odot$  pendant plusieurs semaines

supernova  
(type II)



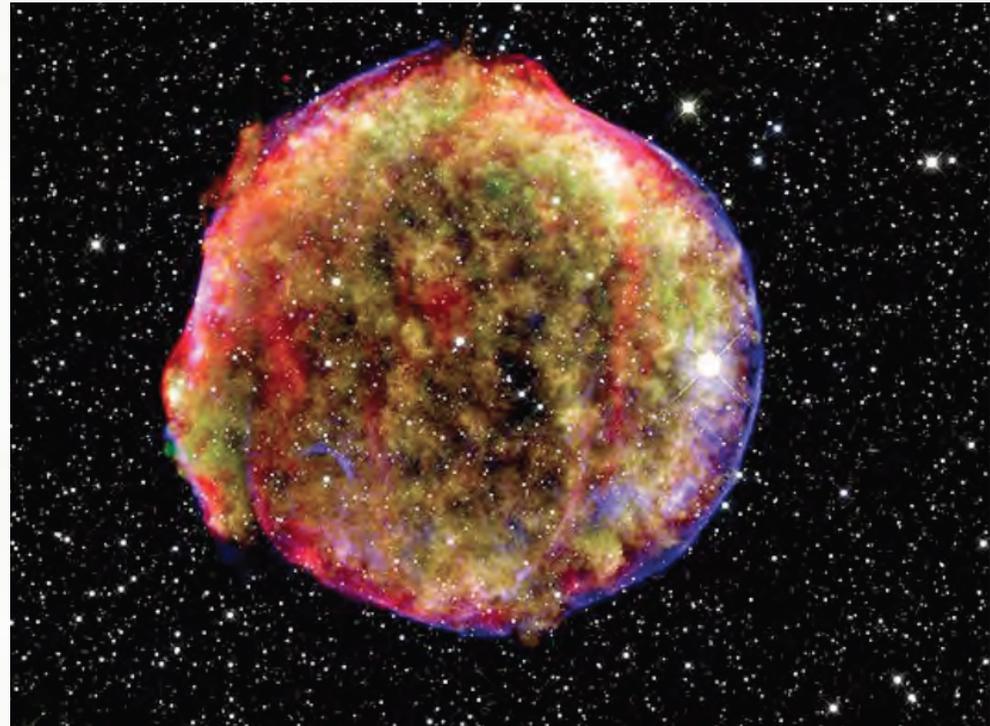
# **SUPERNOVAE**

# LA SUPERNOVA DE TYCHO BRAHÉ EN 1572

- Visible en plein jour



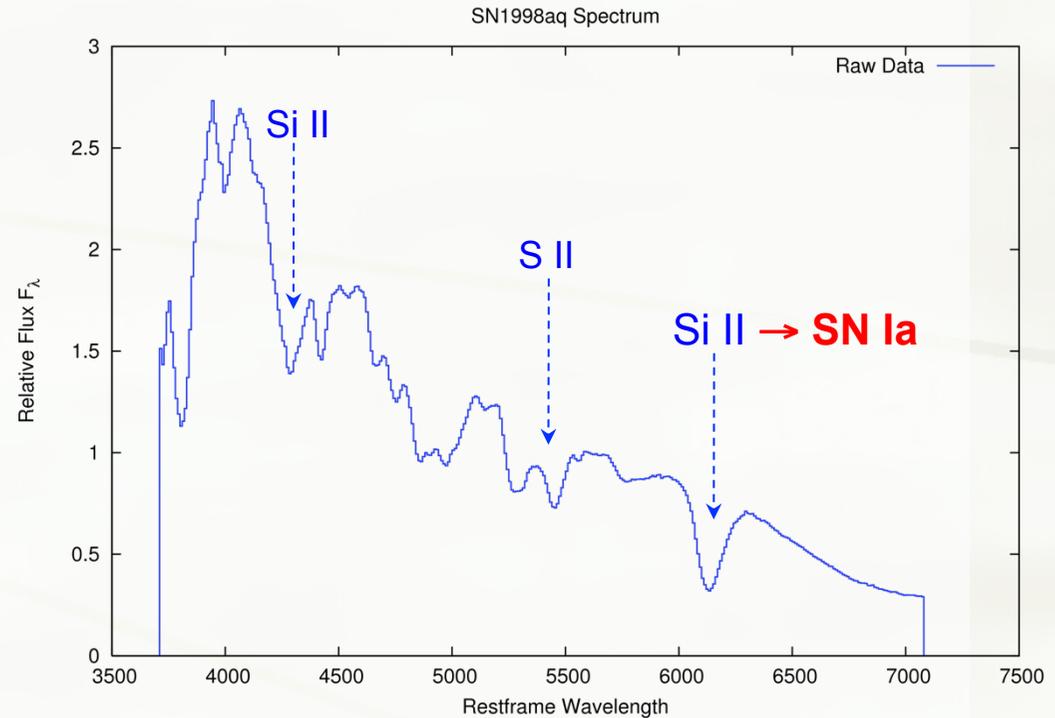
- Aujourd'hui (IR + visible + X)



- Classée SN Ia, distance 2,3 kpc

# CLASSIFICATION DES SUPERNOVAE

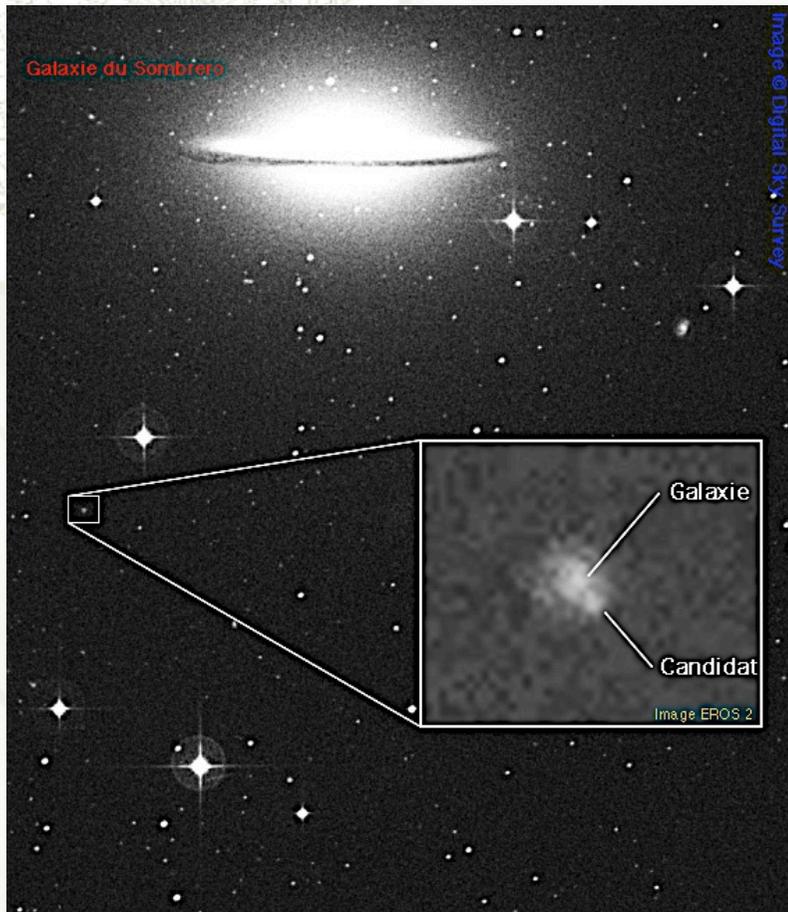
- **À partir du spectre**
- Type I
  - Pas de raie de l'hydrogène
  - Sous-types
    - Ia : raies du silicium Si II
    - Ib : Si, raies de l'hélium
    - Ic: raies ni du Si ni de He
- Type II
  - Raies de l'hydrogène
- En fait, on pense qu'il y a 2 classes
  - Progénitrice = naine blanche CO → type Ia
  - Progénitrice = étoile massive → type Ib, Ic et II



# OBSERVATIONS

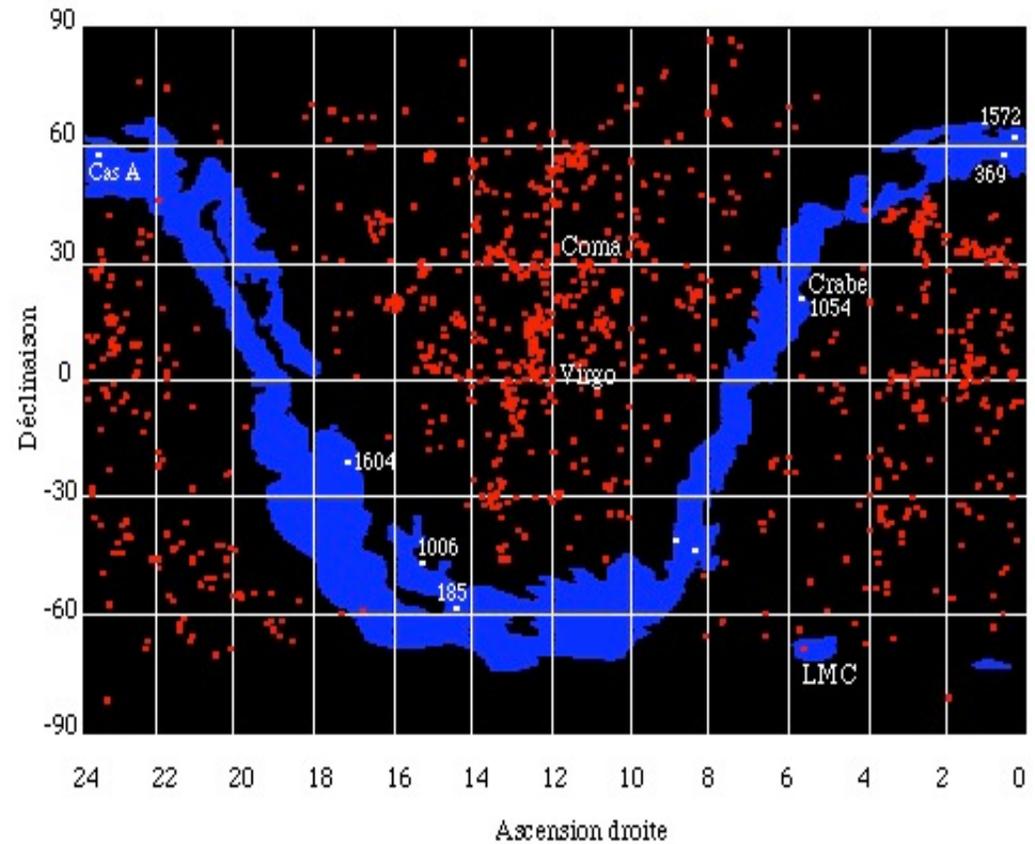


Fritz Zwicky (1898-1974)



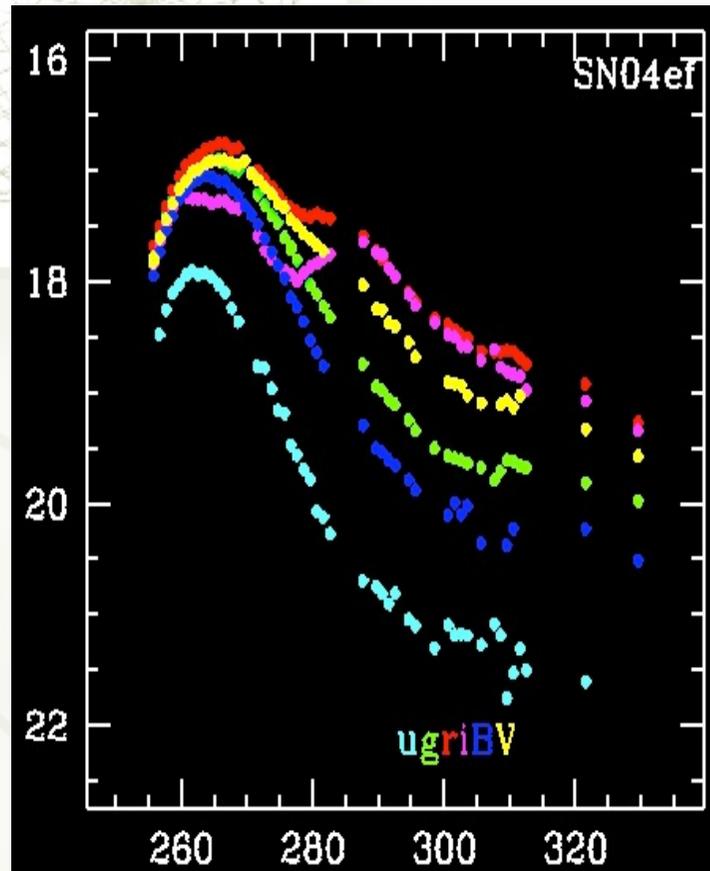
SN1997bl

Distribution des supernovae



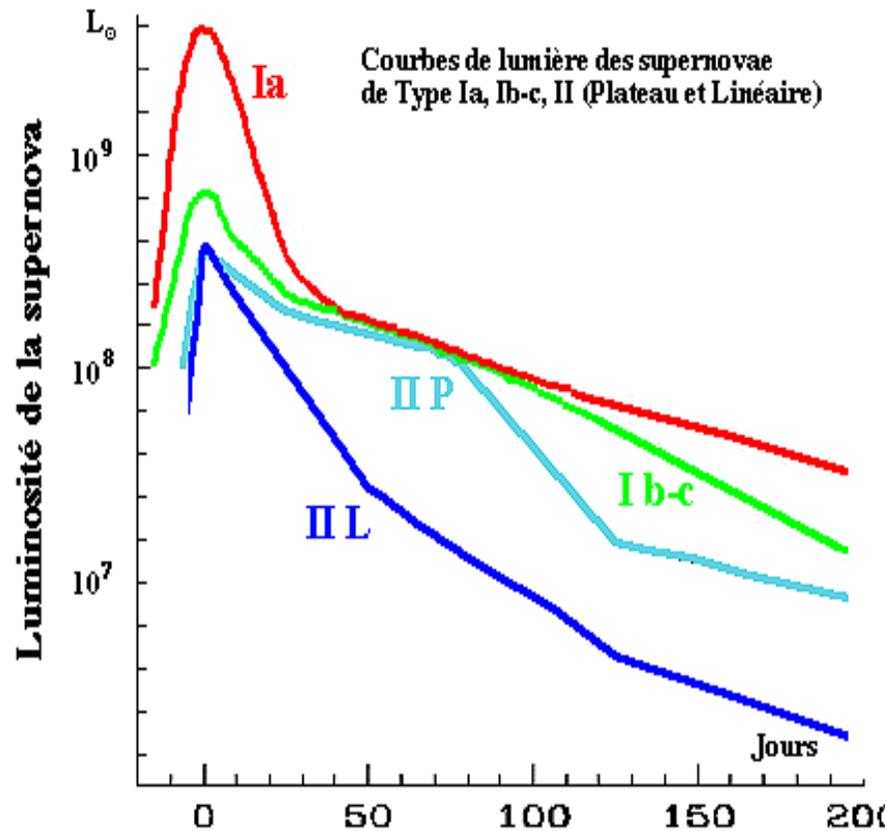
## DÉTECTION ET SUIVI

- SN2004ef dans UGC 12158

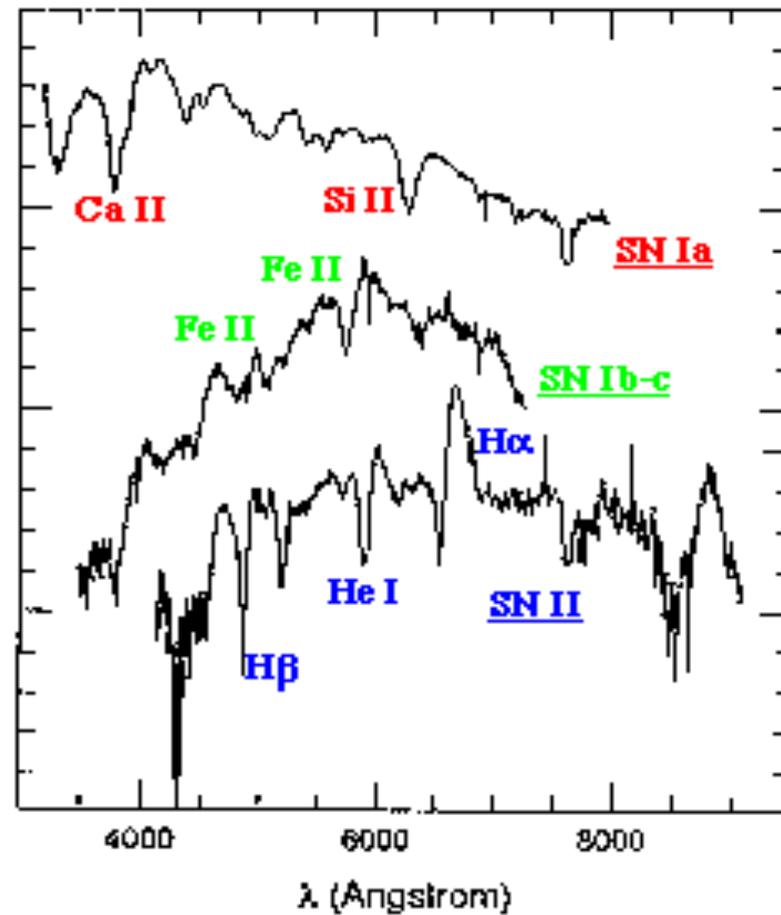


# OBSERVATIONS

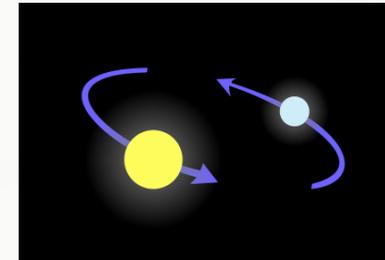
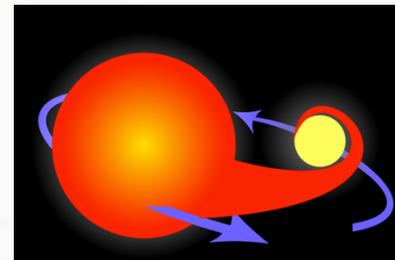
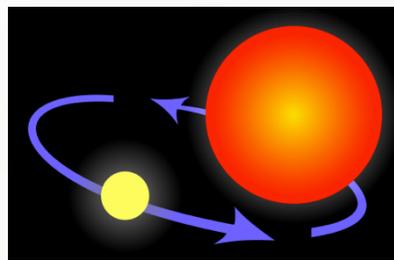
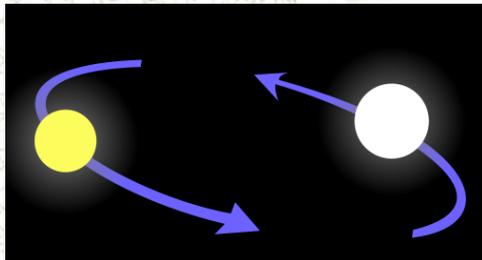
- Courbes de lumière



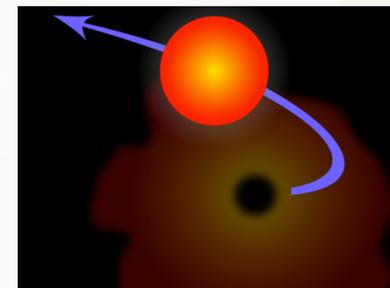
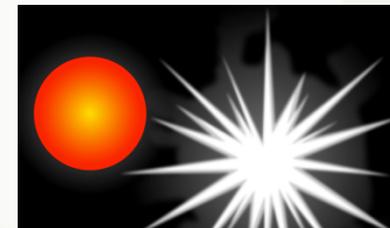
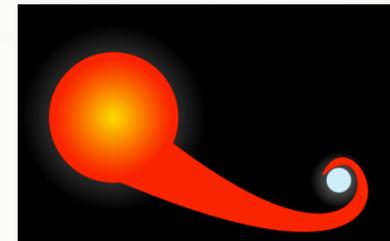
- Spectres



## INTERPRÉTATION THÉORIQUE DES SN DE TYPE IA



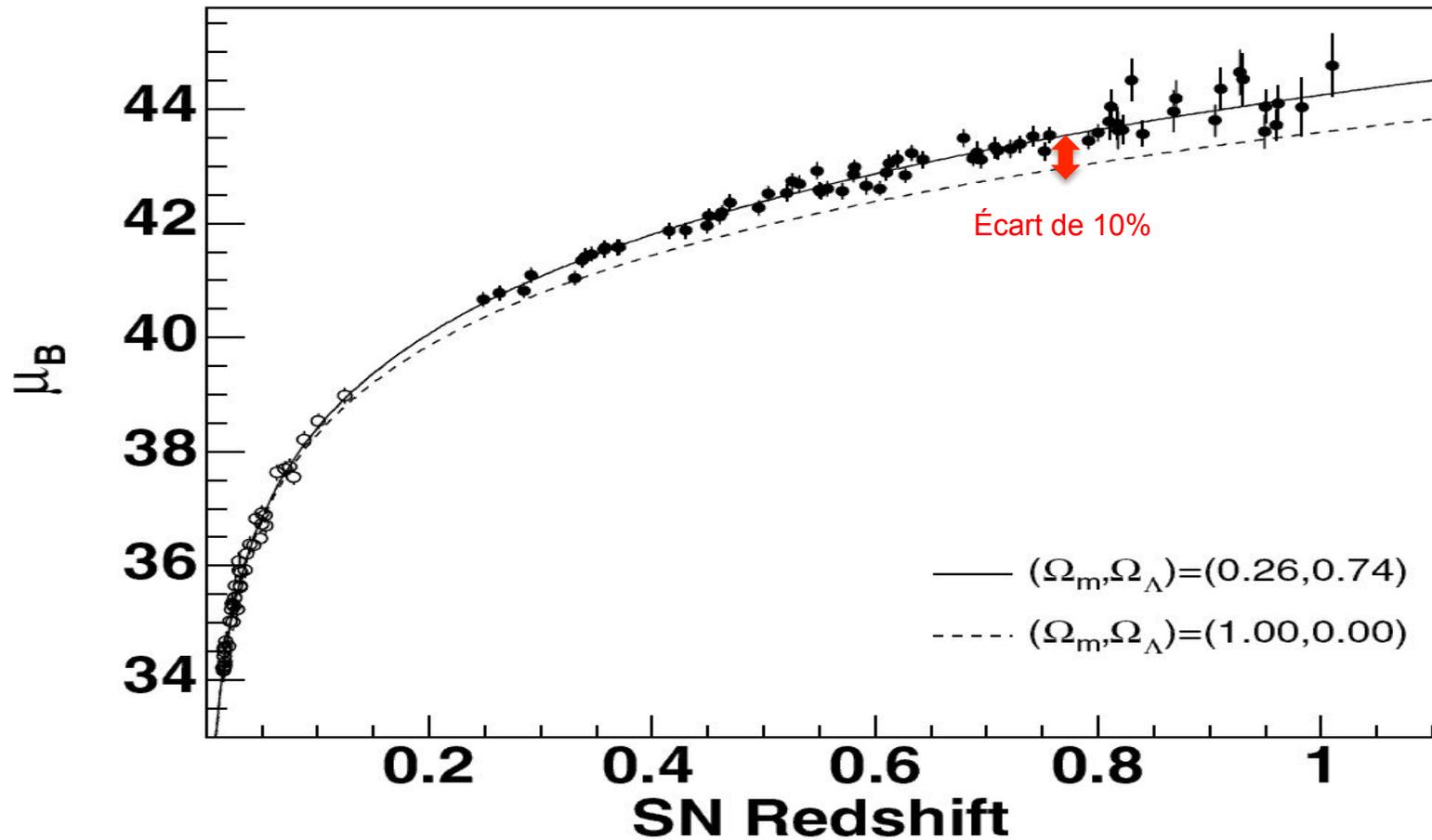
1. Système binaire : 2 étoiles orbitent l'une autour de l'autre
2. La plus massive devient une géante rouges
3. Son atmosphère étendue est absorbée en partie par la seconde étoile
4. La géante rouge devient une naine blanche (de masse *inférieure* à la masse de Chandrasekhar)
5. La seconde étoile devient une géante rouge et son atmosphère étendue est absorbée en partie par la naine blanche
6. qui finit par dépasser la masse de Chandrasekhar → explosion (fusion explosive du carbone en fer et nickel)
7. Et éjection du compagnon ?



⇒ *toutes* les SN Ia correspondent à l'explosion du *même* objet,  
 une naine blanche C-O de  $1,4 M_{\odot}$   
 ⇒ magnitude absolue identique de  $-19,3 \pm 0,1$  ( $\sim 10^{10} L_{\odot}$ )

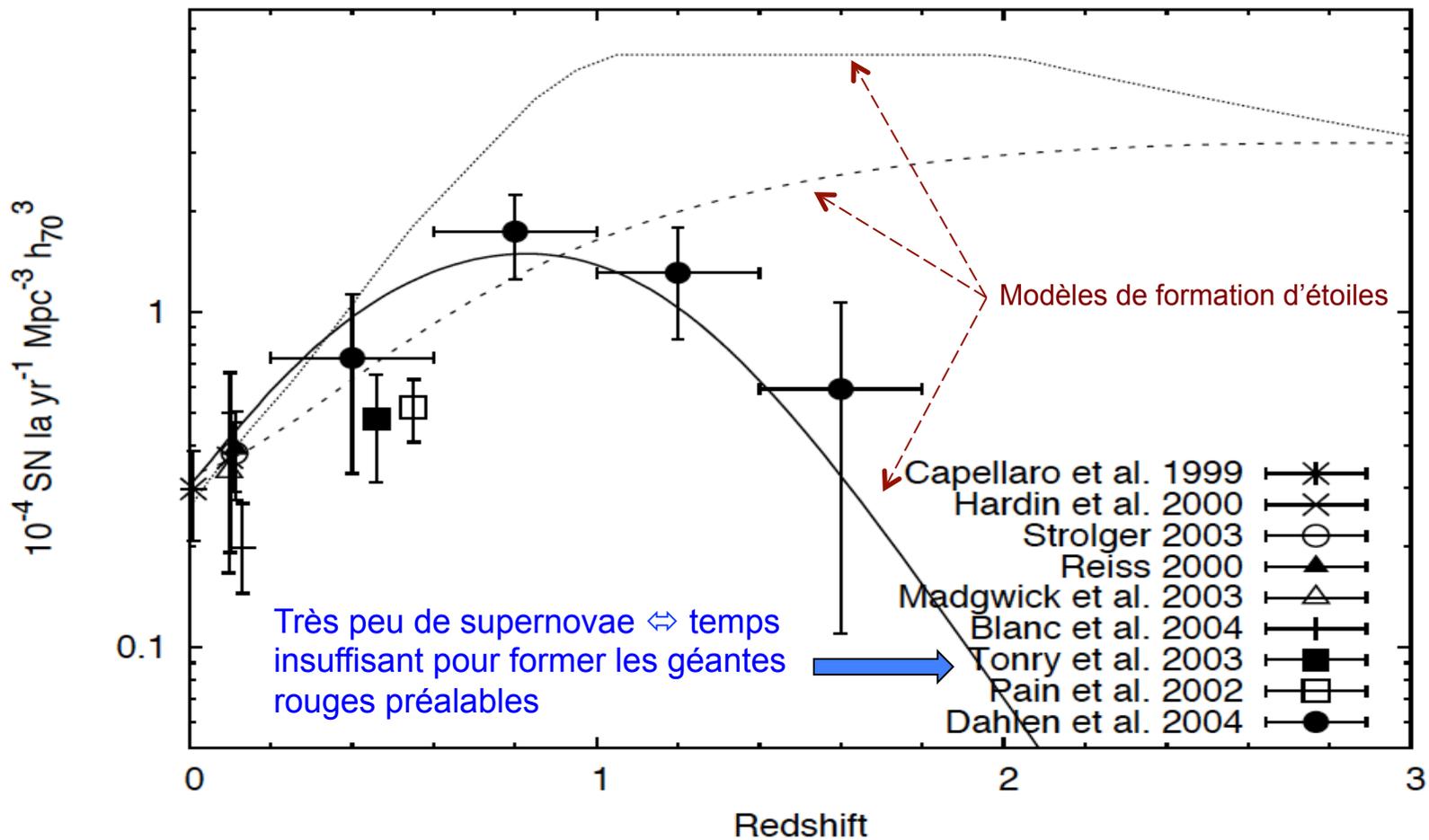
## MARQUEUR DE DISTANCE ?

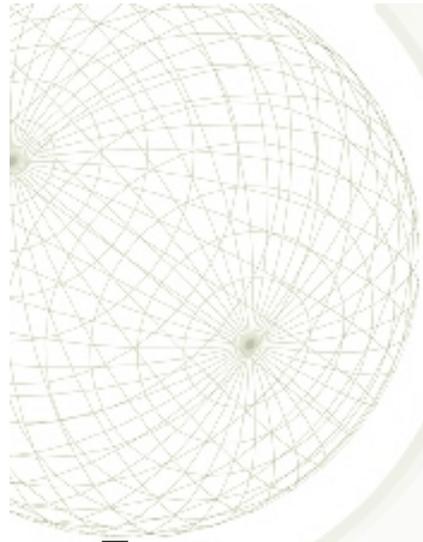
- Les supernovae lointaines sont moins lumineuses qu'on ne s'y attendait → elles sont plus éloignées → l'expansion de l'univers est plus rapide → constante cosmologique ?



# FRÉQUENCE DES SUPERNOVAE

- À peu près 2 ou 3 par siècle par galaxie, tous types confondus





# ÉTOILES À NEUTRONS ET TROUS NOIRS

# ÉTOILES À NEUTRONS

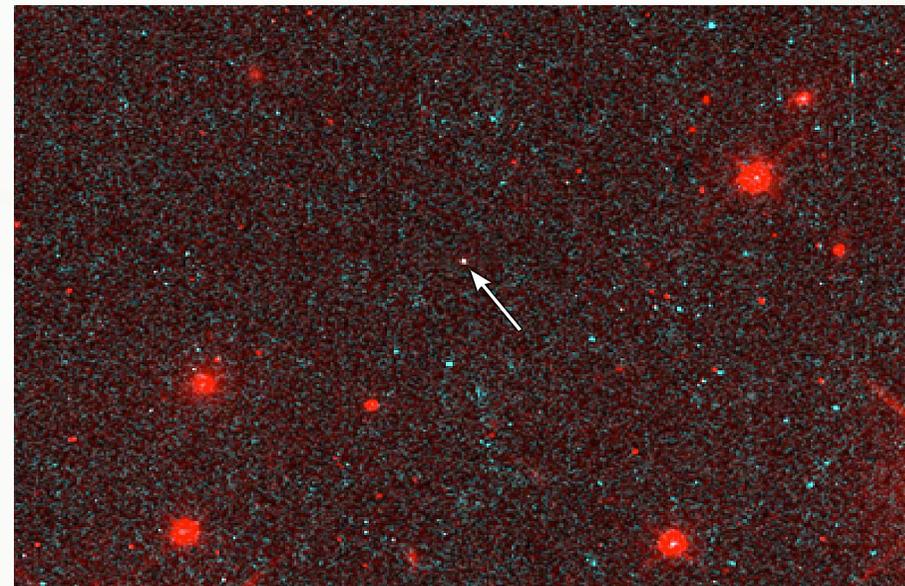
- Le cœur de neutrons survit au centre de la supernova
- *On connaît plus de restes de supernovas que d'étoiles à neutrons*
- Sa masse ne peut pas dépasser la masse de Chandrasekhar Tolman-Oppenheimer-Volkoff

$$M_{\text{TOV}} = 2 \text{ à } 3 M_{\odot}$$

- Au-delà : **trou noir**
- Rayon d'une étoile à neutrons = 5 à 15 km
- Densité > 100 millions de tonnes / cm<sup>3</sup>
- Mais extrêmement difficile à détecter
  - émission essentiellement en X et UV
  - rayon minuscule



Fritz Zwicky (1898-1974)



Étoile à neutrons RX J1856-3754 (160 pc) vue par le HST

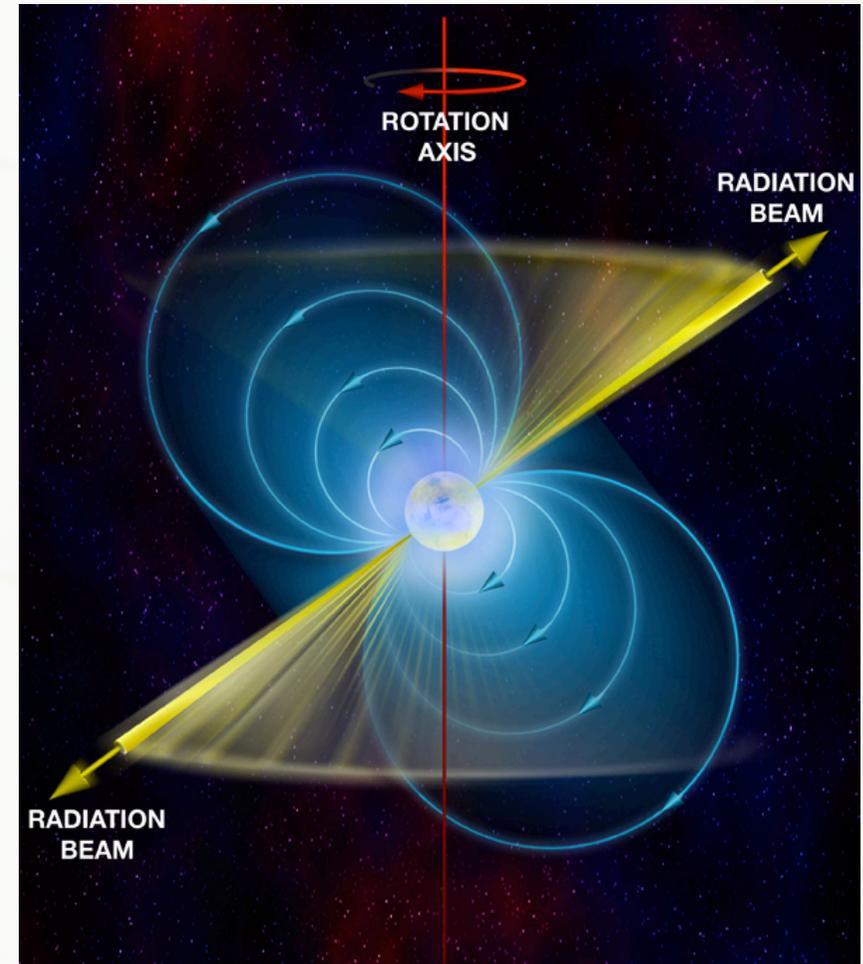
# LA NÉBULEUSE DU CRABE, RESTE DE SN 1054



Nébuleuse du Crabe M1

# PULSARS

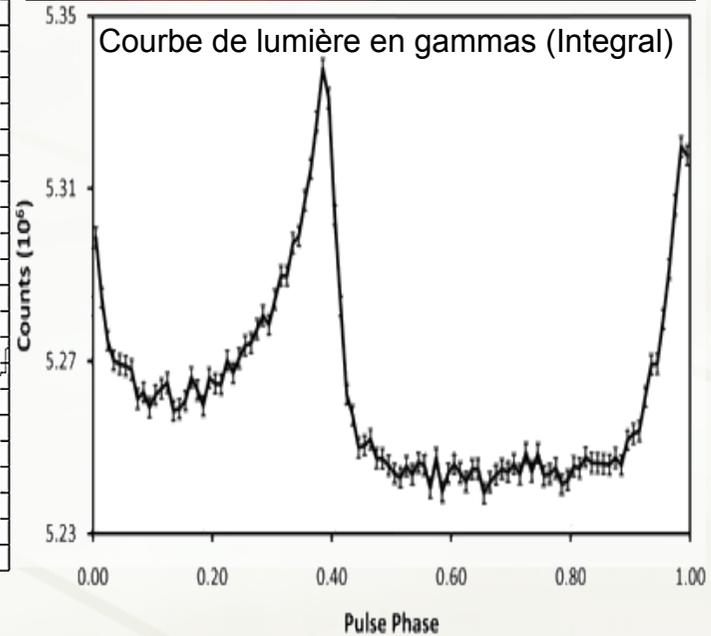
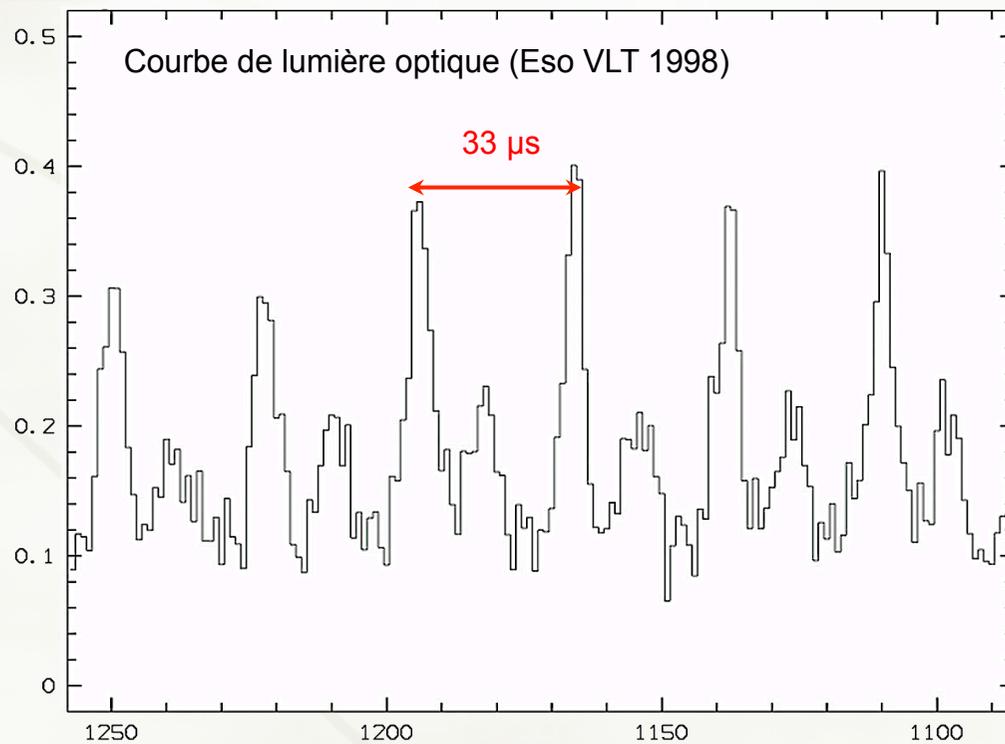
- Conservation du moment angulaire
  - $L = M \omega R^2$
  - le Soleil tourne en 24 jours ( $\sim 2 \times 10^6$  s)
  - rayon = 700 000 km
  - rayon  $\searrow$  7 km  $\Rightarrow$  tour en  $2 \times 10^6 \times (7/700\,000)^2$  s = 200  $\mu$ s
- Conservation du flux magnétique
  - $\Rightarrow$  champ magnétique  $\times (7/700\,000)^2$
  - $\Rightarrow$  extrêmement intense  $\sim 10^{11}$  teslas (Terre 47  $\mu$ T)
- $\Rightarrow$  émission (radio X) alignée le long de l'axe magnétique
- $\Rightarrow$  impulsion (*pulse*) chaque fois que la faisceau est dirigé vers la Terre  $\Rightarrow$  pulsars « milliseconde »



# PULSAR DU CRABE

Le pulsar du Crabe

- en **optique** (HST)
- en **rayons X** (Chandra)



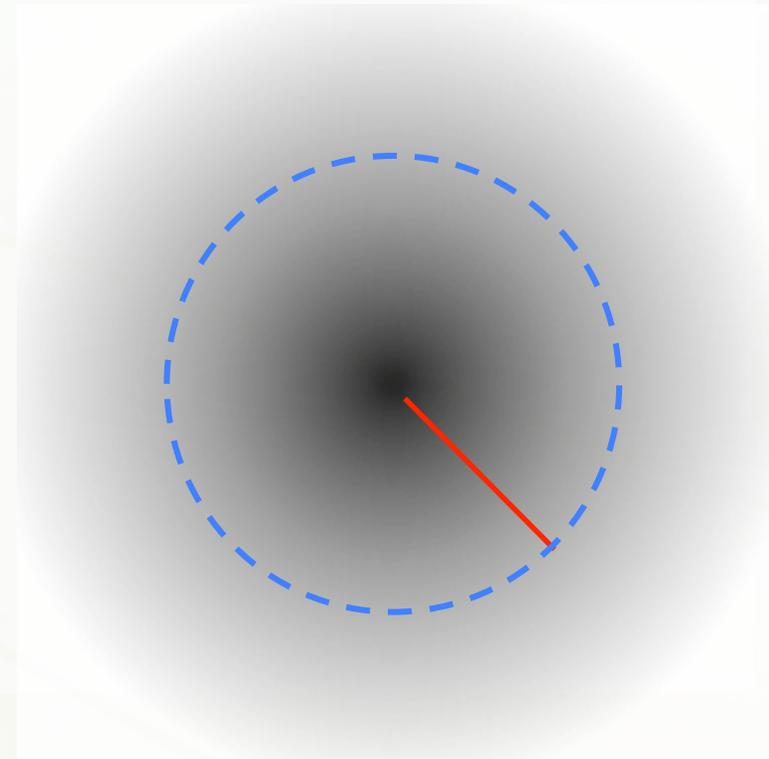
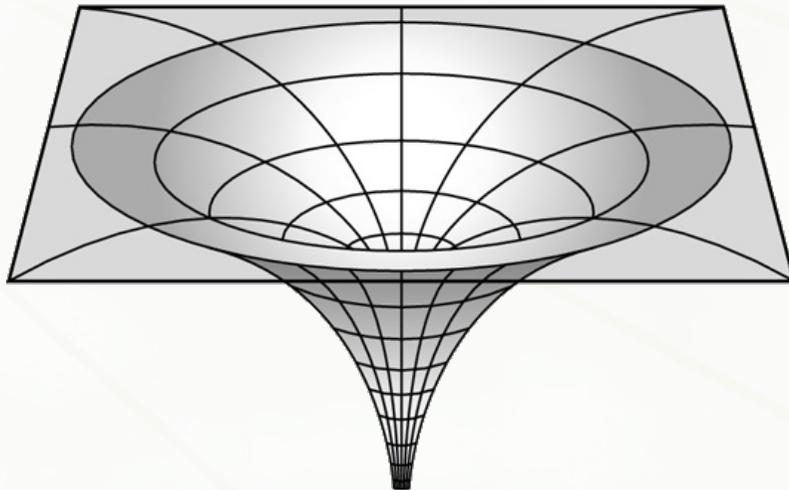
# TROUS NOIRS

- Einstein : La présence de matière influe sur la courbure de l'espace-temps
- Schwarzschild a donné en 1916 la solution générale pour une distribution de matière sphérique et limitée

- Pour une distribution ponctuelle, la courbure devient **infinie** à l'origine

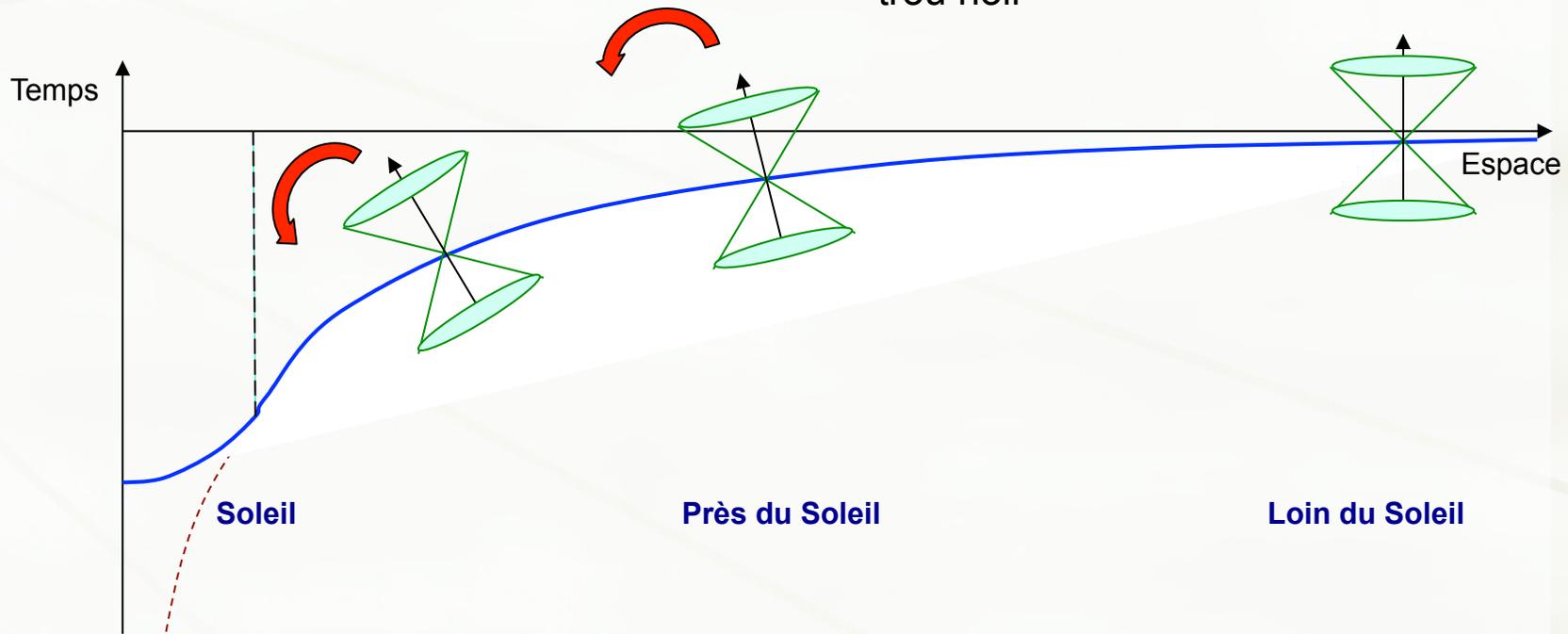
## TROU NOIR

- Circonférence  $\ll 2\pi$  Rayon

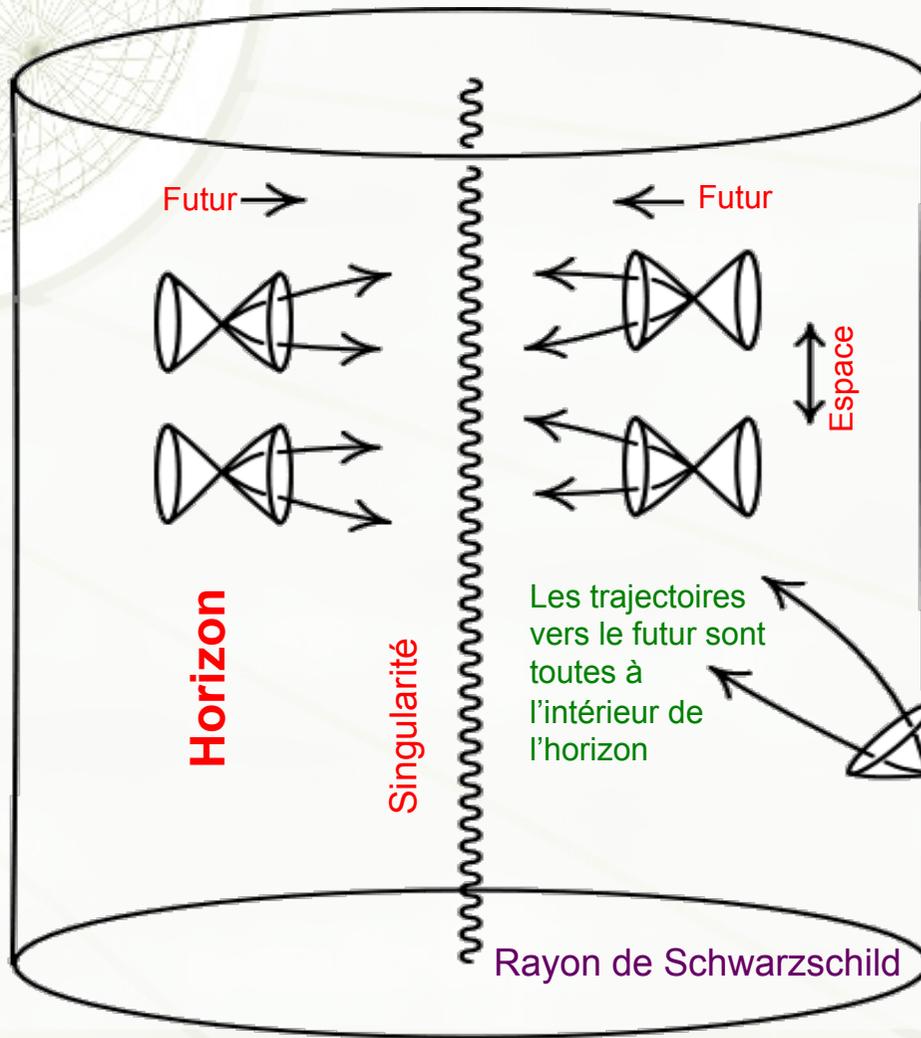


# DÉVIATION DE LA LUMIÈRE ET CAUSALITÉ

- Aucun signal ne peut se propager plus vite que la lumière
- $\Rightarrow$  L'intérieur du cône de lumière est l'ensemble des événements causalement connectés à l'origine
- La déformation de l'espace-temps incline le cône de lumière **en direction de la source** de gravitation
- $\Rightarrow$  quand la gravité devient très intense, le cône est tellement incliné qu'aucun signal ne peut s'éloigner  $\Rightarrow$  trou noir



# ROTATION DES CÔNES DE LUMIÈRE ET HORIZON



Rayon de Schwarzschild

$$R = 2GM/c^2$$

Terre : 9 mm

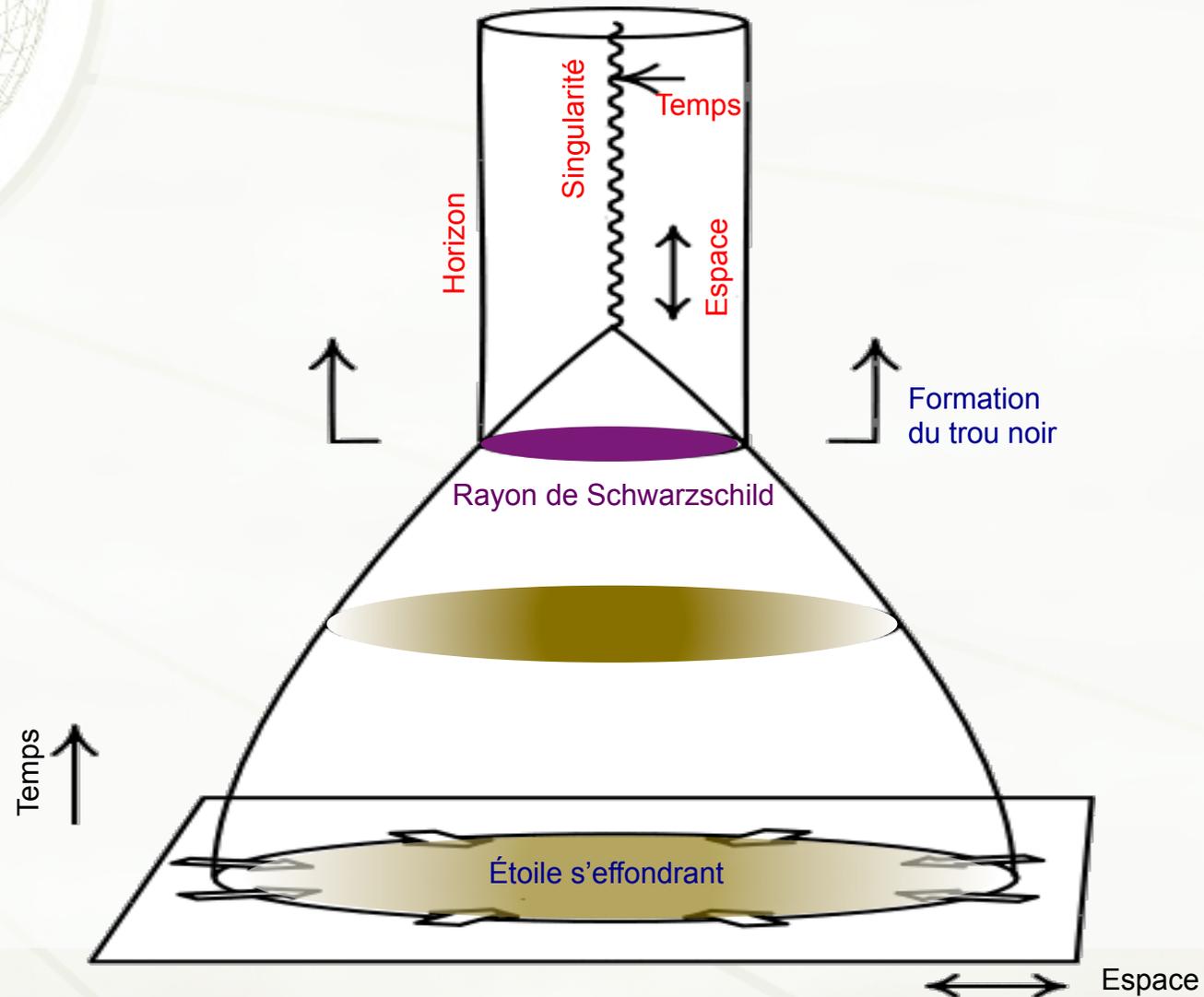
Soleil : 3 km

$5 \times 10^6 M_{\odot}$  : 15 M km

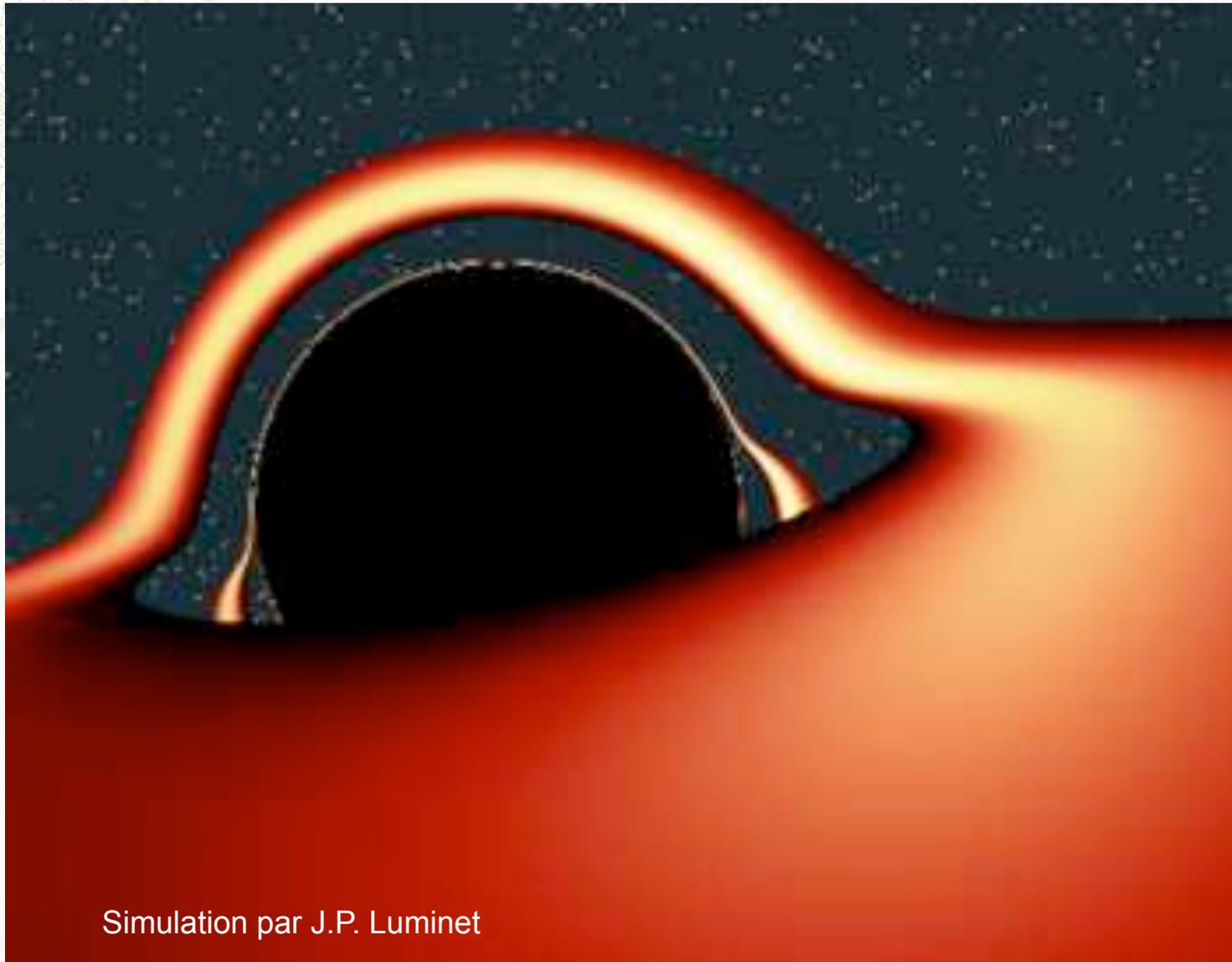
© J.D. Norton, University of Pittsburgh

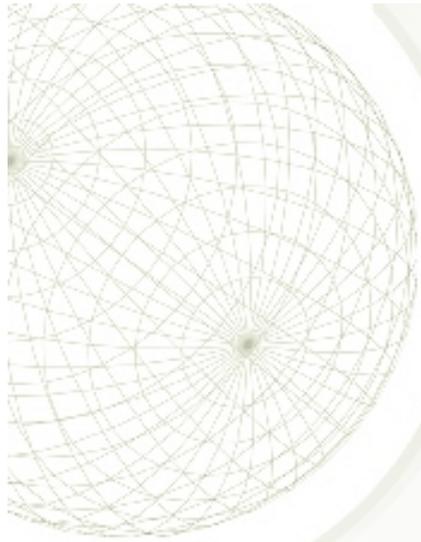
*Rappel : l'espace-temps possède 4 dimensions*

# EFFONDREMENT D'UNE ÉTOILE EN TROU NOIR



## À QUOI RESSEMBLE UN TROU NOIR ?





Merci de votre attention !

