

# La vie d'une étoile

- Le défaut de masse
- Genèse & évolution
- États finaux
  - Naines brunes, naines blanches, étoiles à neutrons, trous noirs
- Nucléosynthèse stellaire

## Notions utilisées :

1. Introduction
- 2-3. Structure de la matière
4. Les ondes
8. Relativité restreinte
9. Relativité générale

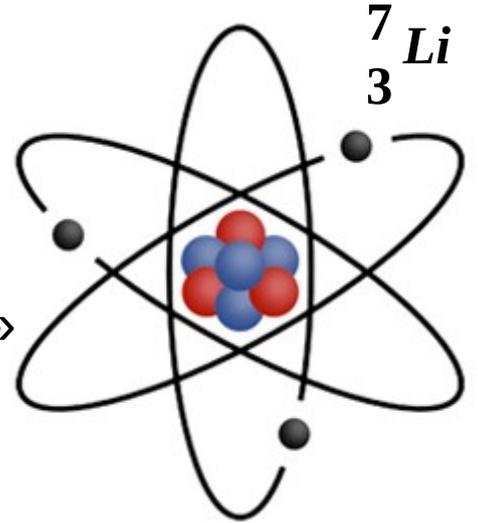


supernova SN 1994D

Pour une meilleure compréhension, certaines explications pourront être légèrement simplifiées/tronquées  
Images : Wikipedia sauf mention contraire

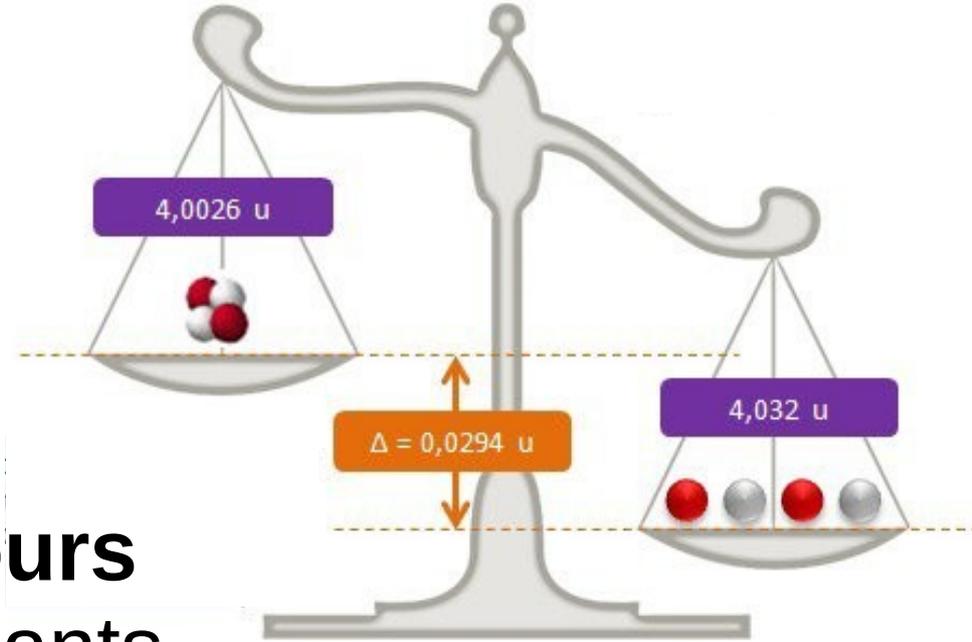
# Rappel : la structure du noyau

- Un **noyau** contient :
  - **Z protons** ( $q=+e$ ) = nature de l'atome
    - Exemple : le noyau d'oxygène contient 8 protons
  - **N neutrons** ( $q=0$ )
    - Peut varier à Z constant : différencie des « isotopes » (Atomes avec le même Z mais des N différents)
  - On nomme « **nombre de masse** »  **$A = Z + N$** 
    - Nombre total de **nucléons** (protons + neutrons)



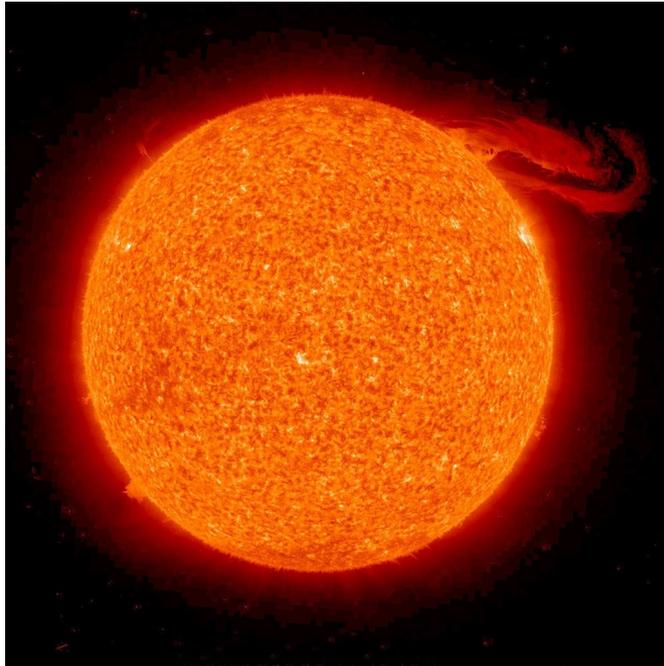
# Le défaut de masse d'un noyau

- C'est la **différence** entre
  - La **masse des nucléons** :  
masse des  $Z$  protons +  
masse des  $N$  neutrons
  - et la **masse du noyau**
- $\Delta > 0$  car un noyau est **toujours plus léger** que ses constituants



# L'énergie de liaison nucléaire

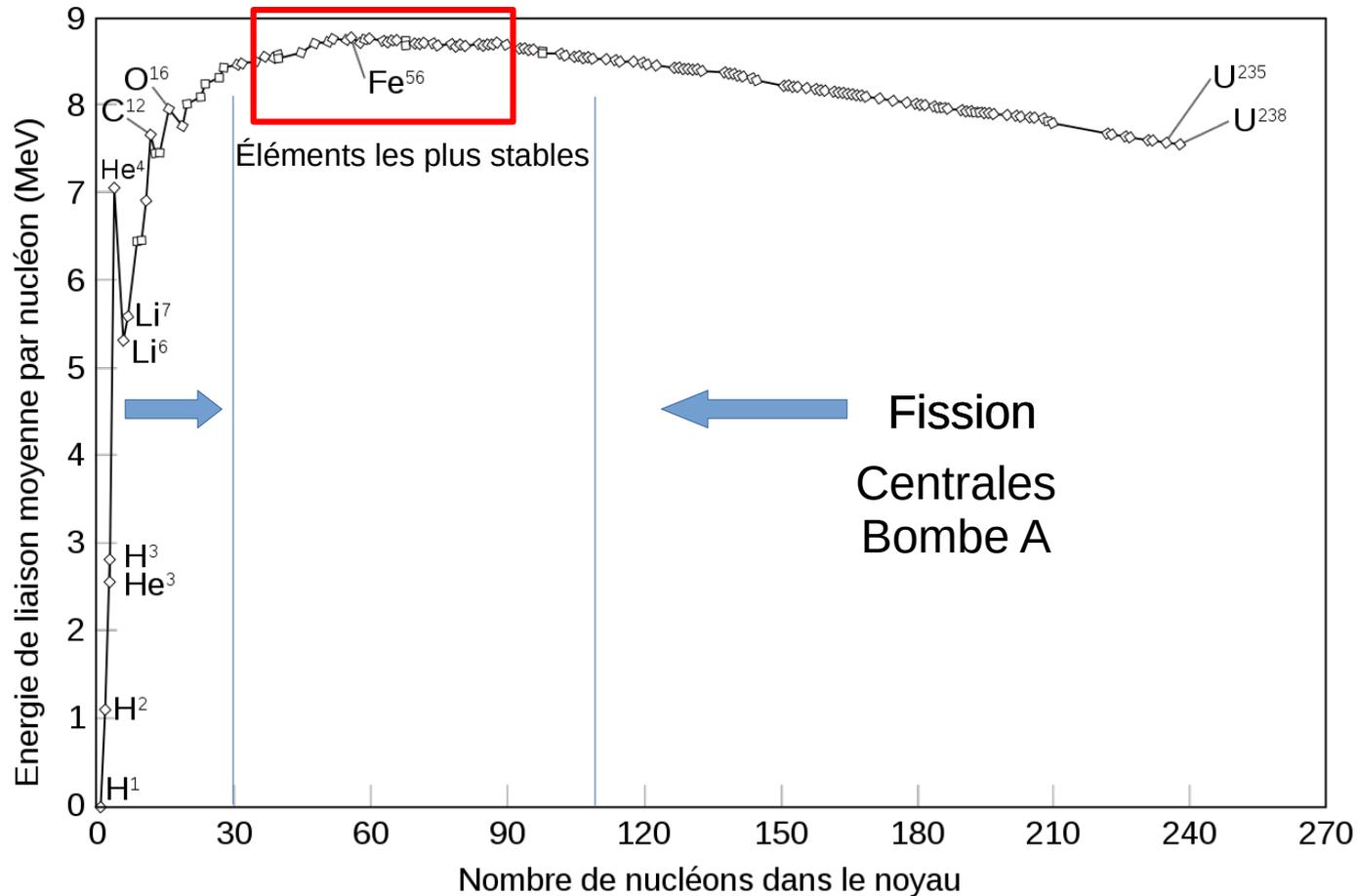
- Principe d'équivalence masse-énergie :  $E = mc^2$
- **Énergie de liaison nucléaire** = défaut de masse  $\times c^2$



Éruption solaire vue en ultraviolet  
avec de fausses couleurs

- C'est l'énergie qu'il faut fournir au noyau pour **séparer ses constituants**
- On étudie en général **l'énergie de liaison par nucléon**
  - Permet de comparer des noyaux avec des nombres de nucléons **différents**
  - **Plus elle est forte, plus le noyau est stable**

# La courbe d'Aston



1 électronvolt =  
**énergie cinétique**  
acquise par un électron  
accéléré depuis le repos  
par une **différence de  
potentiel d'un volt** :

$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Énergie de liaison par nucléon en fonction du nombre de nucléons <sup>5</sup>

# Naissance (stellogénèse)

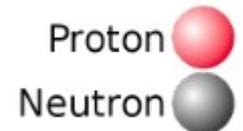
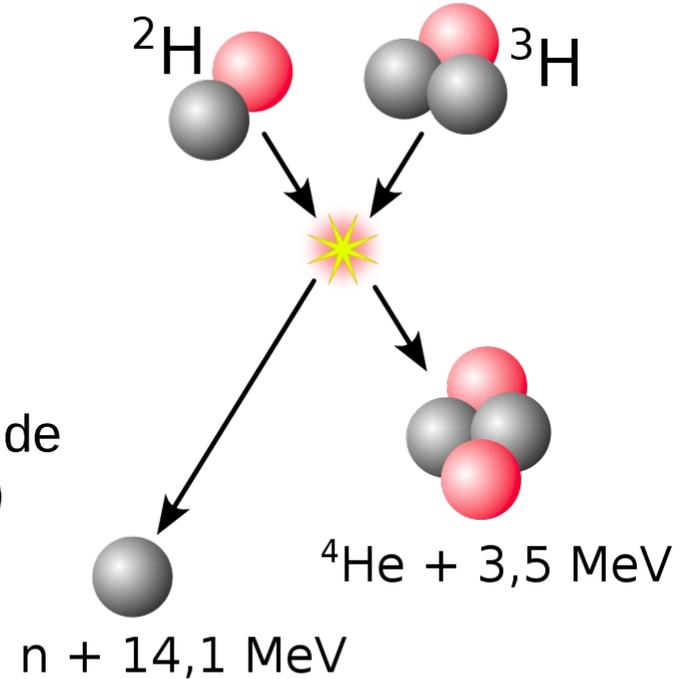
- Les étoiles se forment dans des « **pouponnières stellaires** » à partir de **nuages interstellaires** qui se contractent sous l'effet de la **gravitation**
- Lorsque la pression et la température sont suffisantes, les premières réactions de **fusion nucléaire** commencent
  - « **proto-étoiles** »
    - Au départ, une proto-étoile est homogène
      - 70 % d'hydrogène, 28 % d'hélium et des traces d'autres éléments
- La **masse** d'une étoile est l'élément déterminant de son évolution
  - Cycle de vie et vitesse d'évolution



J025157.5+600606

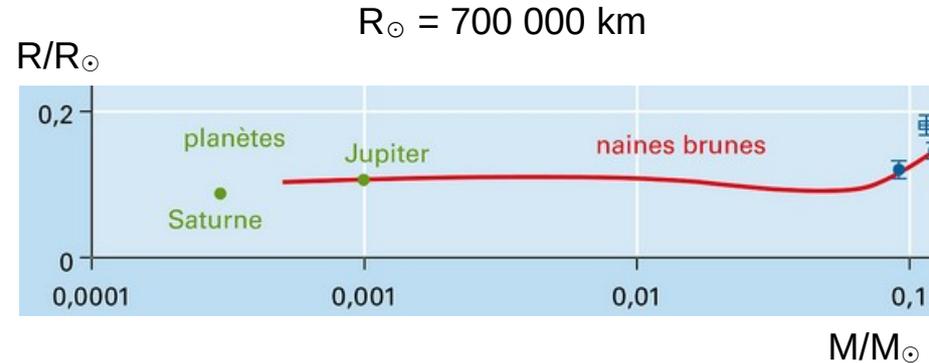
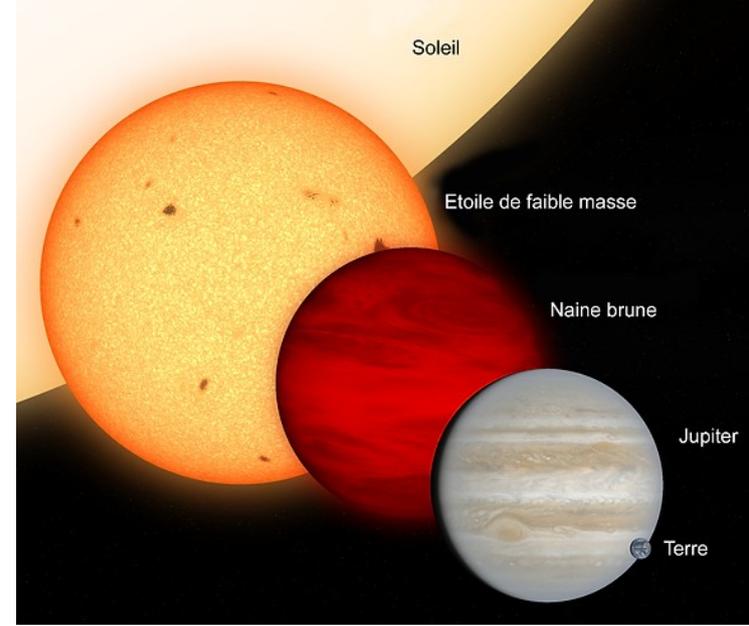
# La fusion nucléaire

- A lieu dans le **cœur** de l'étoile
  - Température au cœur du Soleil : 15,7 millions de K
- Les noyaux d'hydrogène fusionnent en hélium
  - Réaction simplifiée :  $H \rightarrow {}^4\text{He} + \text{particules} + \text{énergie}$
- Le Soleil
  - Produit  $4 \times 10^{26}$  W (400 millions de milliards de milliards de watts – 400 millions de milliards de centrales nucléaires)
    - On en reçoit une fraction de  $4 \times 10^{-10}$  ( $\sim 10^3$  fois notre consommation totale)
  - Est si dense que les photons mettent **10 000 à 100 000 ans à sortir**
  - Température en surface : 5700 K (d'où sa couleur jaune/blanc)



# Les naines brunes

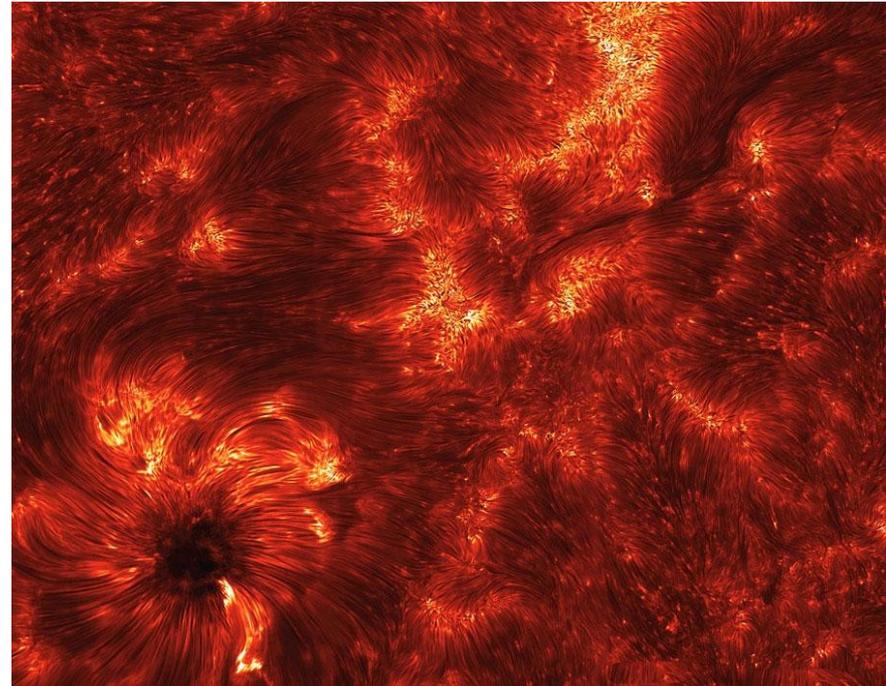
- Ou « **étoiles manquées** »
- Objet **substellaire** dont la masse est inférieure à la masse minimale nécessaire à la **fusion thermonucléaire de l'hydrogène**
  - (mais suffisante pour la fusion nucléaire du deutérium  $^2\text{H}$ )
  - entre les planètes les plus massives et les étoiles les moins massives :  $13 M_J < M < 75 M_J$  (masse jovienne :  $2 \times 10^{27}$  kg), soit  $0,01 M_\odot < M < 0,07 M_\odot$
- **Courte phase de réactions nucléaires** puis la chaleur émise provient uniquement de sa **contraction gravitationnelle** ( $T \sim 1000 - 2000\text{K}$ )
- Pourraient composer une partie importante de la masse de l'Univers



# La séquence principale

- Période de la vie d'une étoile pendant laquelle il y a **équilibre** :
    - La force de gravitation tend à **contracter** l'étoile (force **centripète**)
    - La **pression de rayonnement** due aux **réactions de fusion** de l'hydrogène qui libèrent de l'énergie tend à **dilater** l'étoile (force **centrifuge**)
  - Environ 90 % des étoiles observées au-dessus de  $0,5 M_{\odot}$  sont sur la **séquence principale**
  - Pour notre Soleil, cette séquence dure ~ **10 milliards d'années**
    - (âge actuel ~ **5 milliards d'années**)
- « Spicules » (jets de gaz contenus dans des champs magnétiques) à la surface du Soleil

<http://www.astronoo.com/fr/articles/voyage-du-photon.html>



# Les géantes rouges (1)

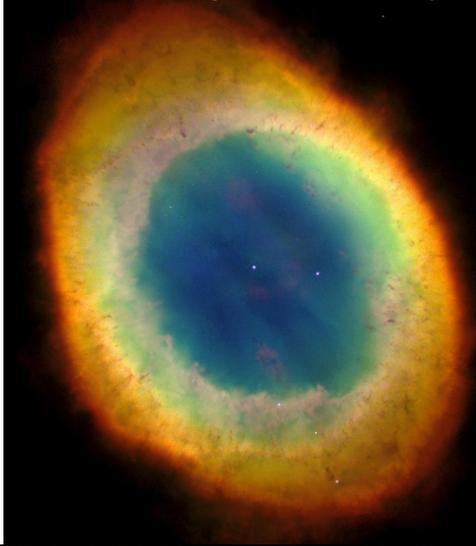
- Étoile de masse  $0,3$  à  $\sim 10 M_{\odot}$  qui a **terminé sa séquence principale**
  - a **épuisé** l'hydrogène de son noyau
  - a commencé la **fusion de l'hydrogène** dans la **coquille** entourant le noyau (car l'effondrement de l'étoile a repris et la  $T_p$  de la coquille a augmenté)
- Caractéristiques
  - Rayon =  $10-100 R_{\odot}$ , d'où « géantes »
    - $R_{\odot} = 700\,000$  km
  - $T_p$  de surface  $\sim 3000-4000$  K, d'où « rouges »
  - Luminosité jusqu'à  $3000 L_{\odot}$  (en raison de la taille)
- Pour notre Soleil, dure **1 milliard d'années**
  - Détruira la Terre



# Les géantes rouges (2)

- **Poursuite de la fusion** vers des éléments de plus en plus lourds : C, O
- La température atteint  $10^9$  K
- Fin de vie :
  - Éjection des couches externes
  - Naine blanche et nébuleuse planétaire
  - → naine noire une fois refroidie

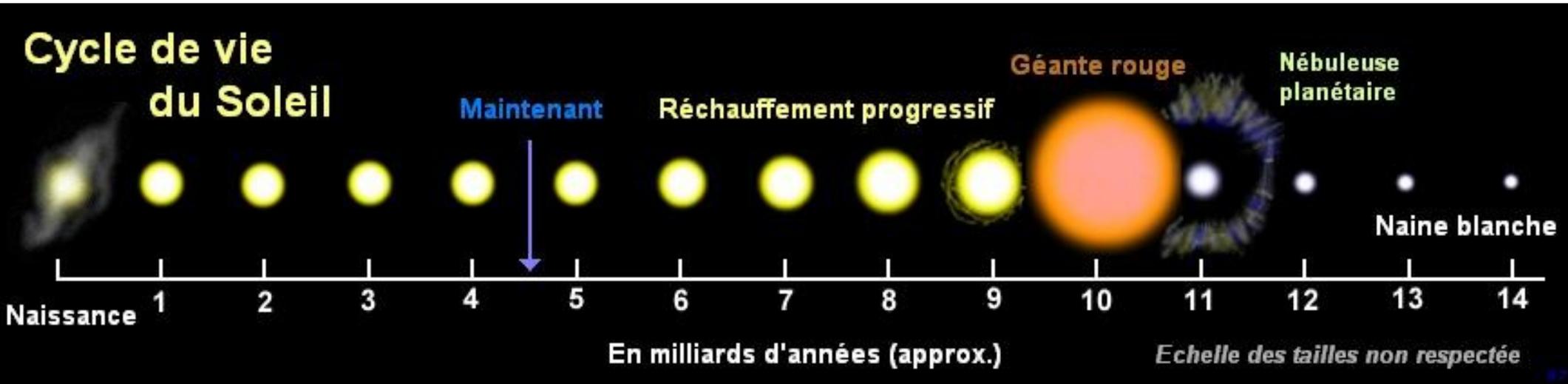
La nébuleuse planétaire de la Lyre



NGC 6751, ou nébuleuse de l'Œil étincelant

# Vie du Soleil – résumé

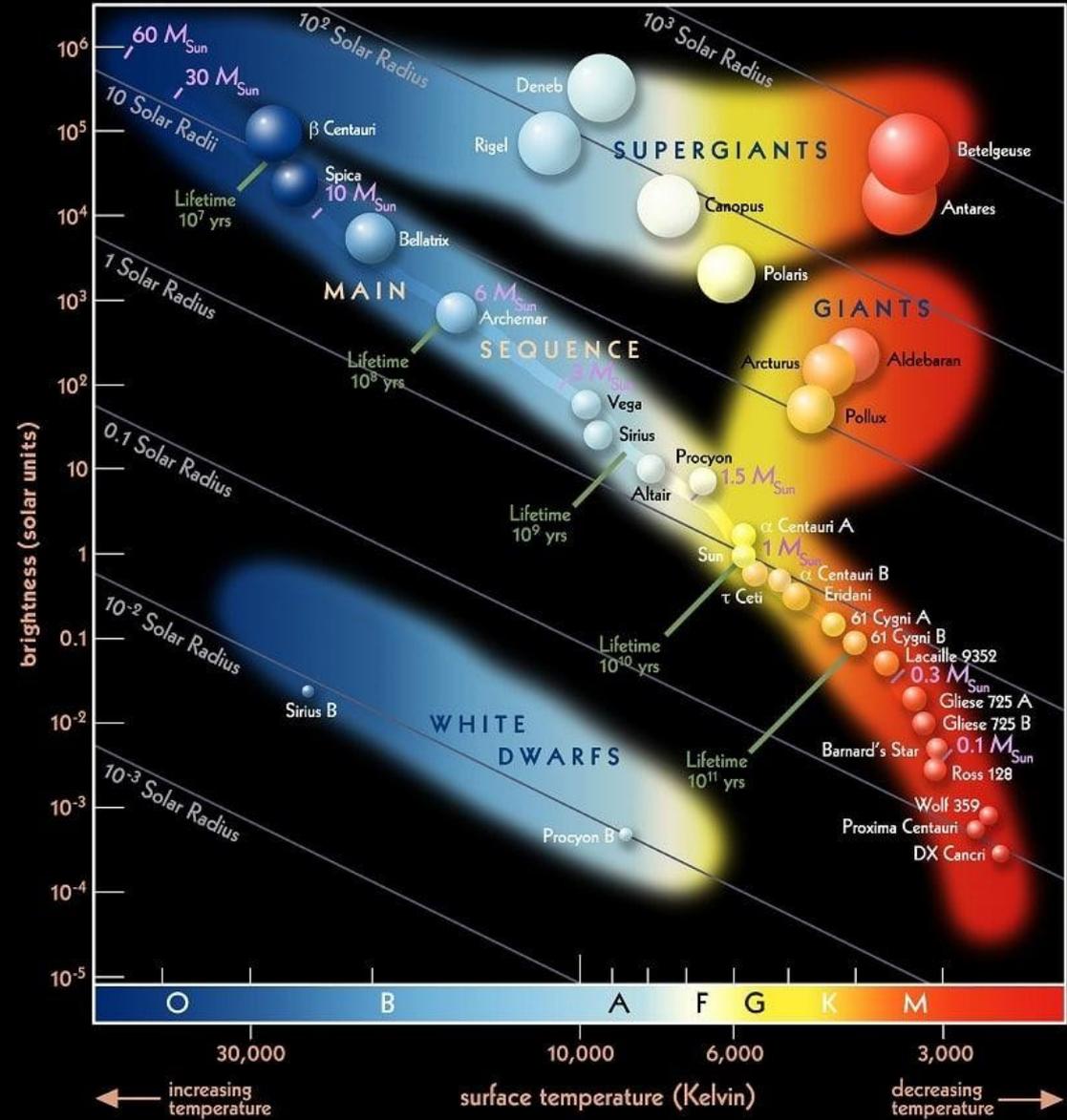
- Et des étoiles de masse  $< 10 M_{\odot}$



- Evolution plus rapide pour les étoiles plus massives

# Le diagramme H-R

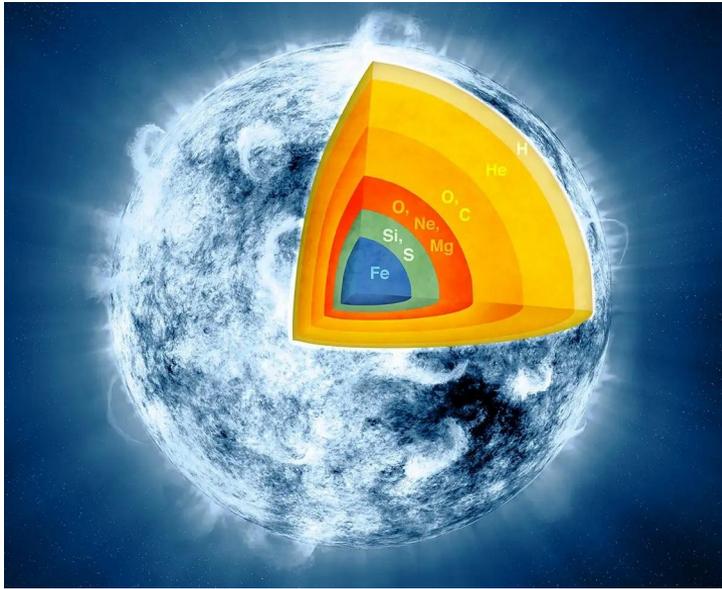
- Diagramme de Hertzsprung-Russell
- Représente les différentes classes d'étoiles en fonction de
  - Température de surface
  - Luminosité



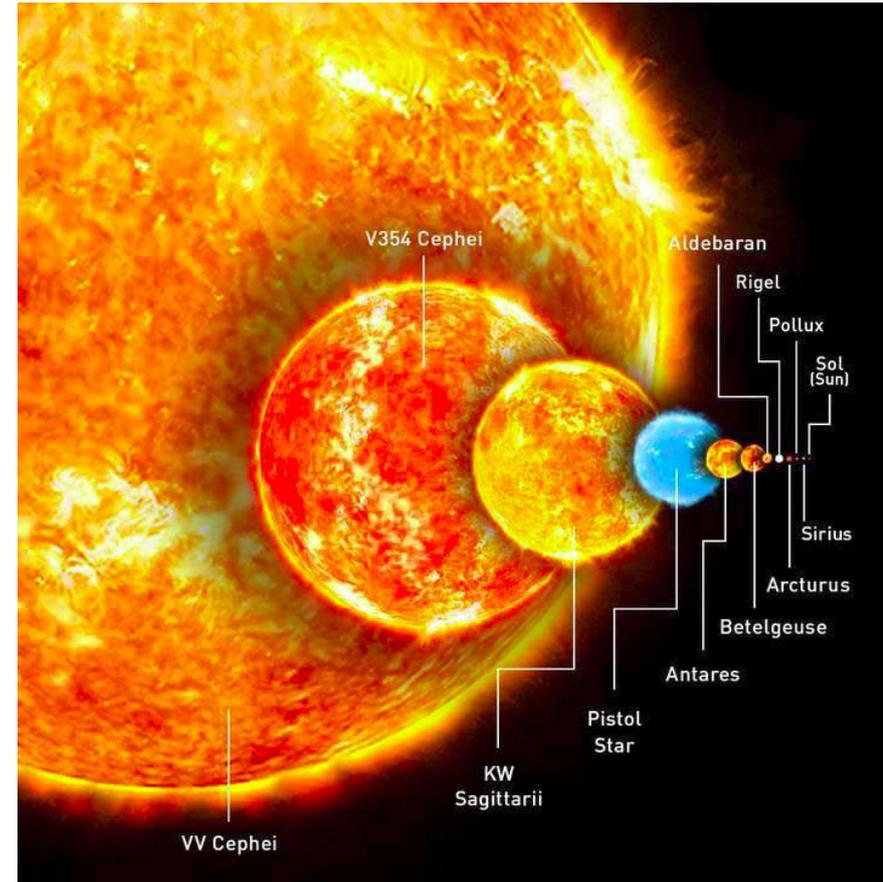
<https://localcrew.ru/wp-content/uploads/2020/06/hertzsprung-russell-diagram.jpeg>

# Les supergéantes rouges

- Lorsque  $M > 10 M_{\odot}$ , **la fusion se poursuit jusqu'au fer** (élément le plus stable) : C, N, O, Ne, Mg, Si, Ni, Fe → Structure en oignon
- **Étapes de plus en plus rapides**

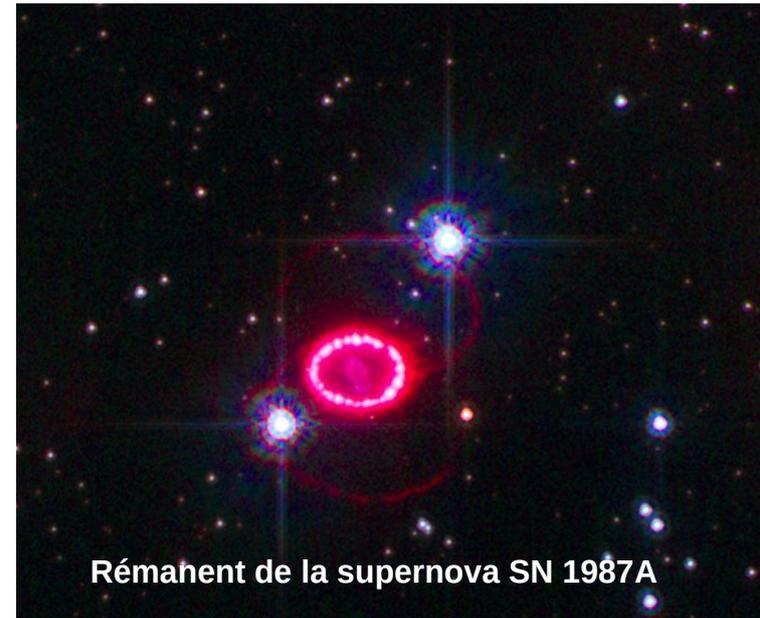


<https://www.lecielenquestions.fr/post/evolution-des-etoiles-massives>  
<https://www.futura-sciences.com/sciences/actualites/astrophysique/astrophysique-supernovae-nustar-nous-plonge-coeur-etoiles-explosion-52442/>



# Fin de vie d'une supergéante

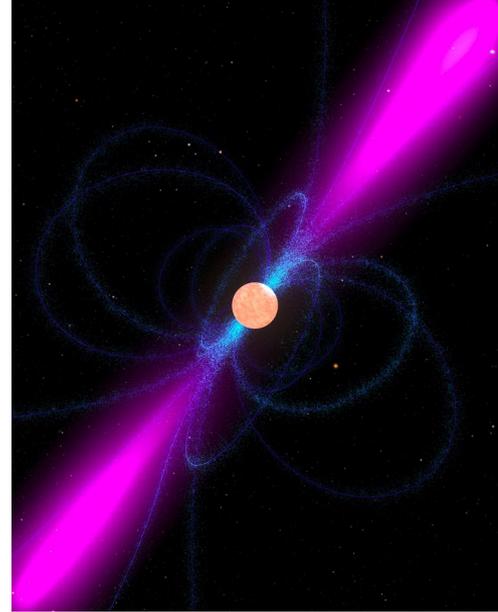
- Le fer étant l'élément le plus stable, **plus de fusion possible**
  - le **cœur de fer** n'est **plus en équilibre** (plus de force centrifuge)
  - il **s'effondre** sur lui-même : **les protons absorbent les électrons**  
→ **neutrons**
- Explosion : **Supernova & sursaut gamma**
  - Expulsion des couches extérieures
  - Création de nouveaux éléments chimiques **plus lourds que le Fe**
  - $< 25 M_{\odot}$  : noyau → étoile à neutrons
  - $> 25 M_{\odot}$  : noyau trop lourd → trou noir



Rémahent de la supernova SN 1987A

# Les étoiles à neutrons

- Principalement composées de **neutrons** maintenus ensemble par les **forces de gravitation**
- Diamètre  $\sim 10$  km, **densité**  $= 3-6 \times 10^{17}$  kg / m<sup>3</sup> ,
  - comparable à la **densité du noyau atomique** ( $2 \times 10^{17}$  kg / m<sup>3</sup>)
  - Une cuillère à café de son matériau aurait une masse  $> 5 \times 10^{12}$  kg (Une sphère de 150 m de rayon est aussi lourde que la Terre)
- Si elle tourne rapidement sur elle-même et qu'elle possède un puissant champ magnétique, elle projette alors le long de son axe magnétique un mince faisceau de radiations
  - un observateur placé sur le trajet du faisceau observe une émission pulsée (effet de phare  $\rightarrow$  « pulsar »)



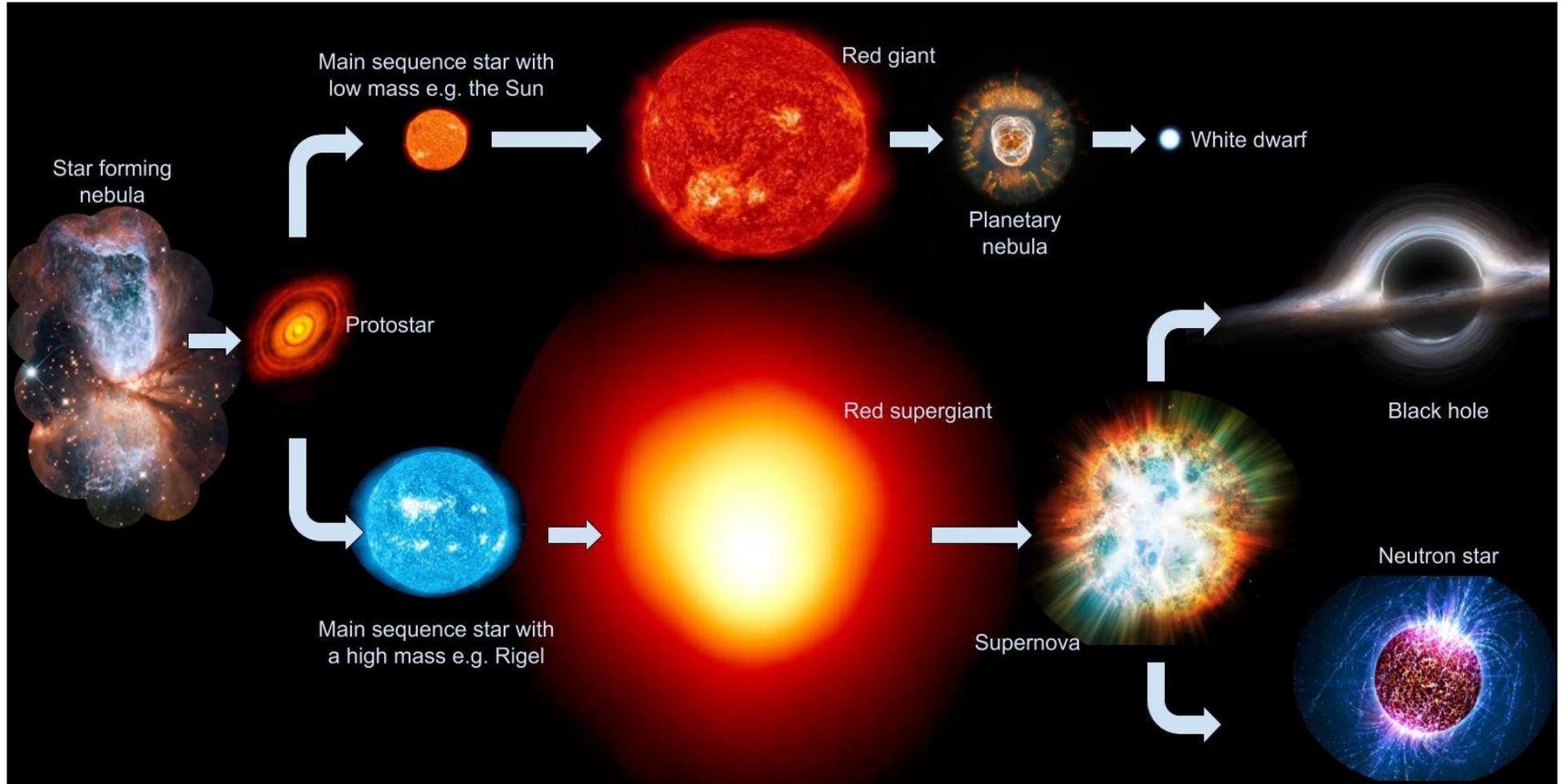
# Les trous noirs

- Objets célestes si **compacts** que l'intensité de leur **champ gravitationnel** empêche toute forme de **matière** ou de **rayonnement** de s'en échapper
- Ne peuvent **ni émettre, ni diffuser la lumière**
  - sont donc **noirs**, optiquement **invisibles**
  - Différentes techniques d'**observation indirecte** permettent d'étudier de nombreux phénomènes qu'ils induisent : **disques d'accrétion**, **lentilles gravitationnelles**, ...
- Présence de **trous noirs supermassifs** au centre des galaxies
- **Quasar** (quasi-stellar astronomical radiosource) : trou noir supermassif entouré par une **zone extrêmement lumineuse**
  - Peut « dévorer » 10-1000  $M_{\odot}$  par an
  - Ex : ULAS J1342+0928 est vraisemblablement un trou noir de  $\sim 8 \times 10^8 M_{\odot}$  et a une luminosité de  $4 \times 10^{14} L_{\odot}$



Le disque d'accrétion du trou noir M87\* imagé par l'Event Horizon Telescope. Le trou noir lui-même est invisible, au centre de la zone noire centrale.

# Cycle de vie d'une étoile – résumé



# Nucléosynthèse (poussières d'étoiles...)

