

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

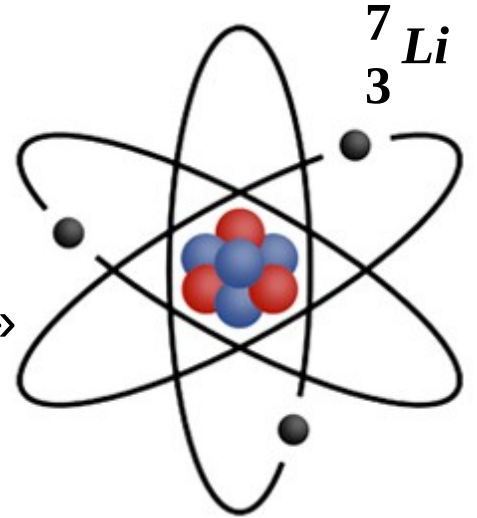


supernova SN 1994D

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

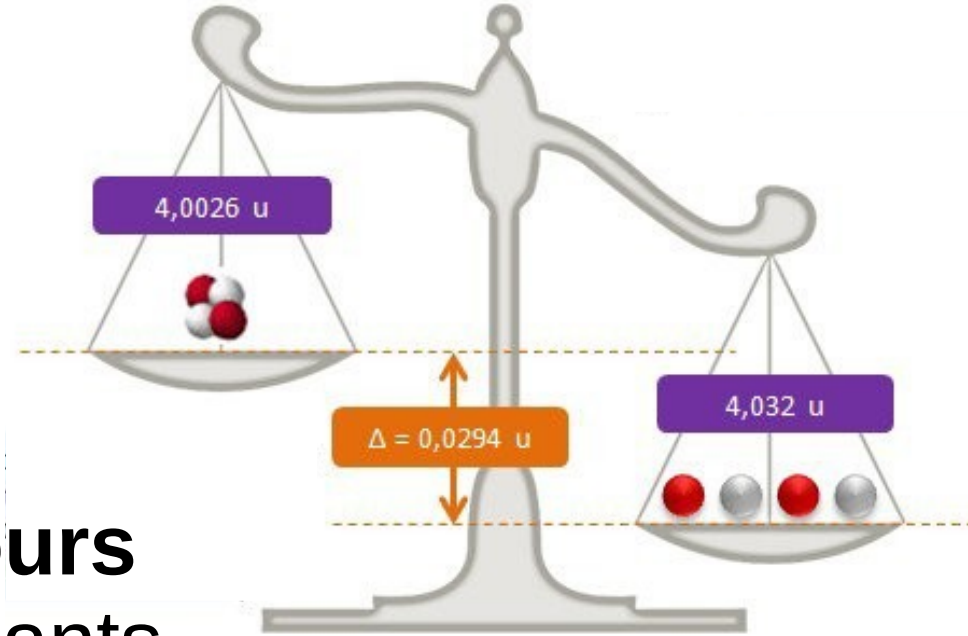
Rappel : la structure du noyau

- 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)



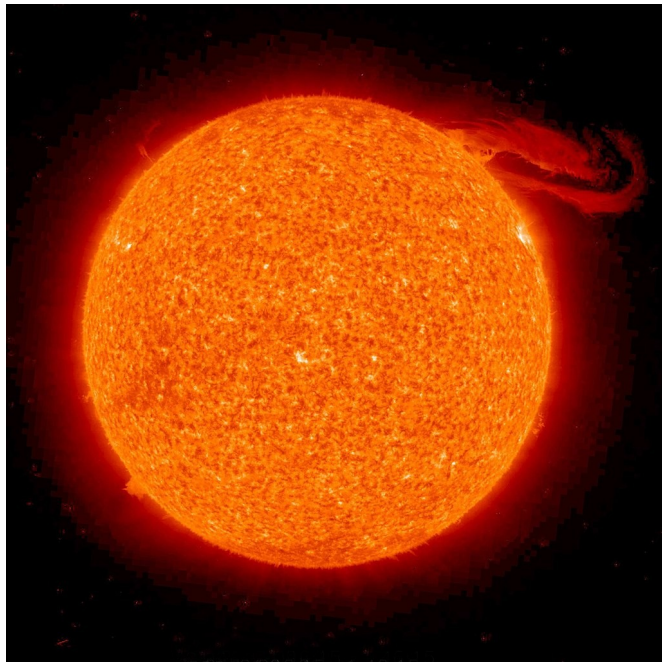
Le défaut de masse d'un noyau

- 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

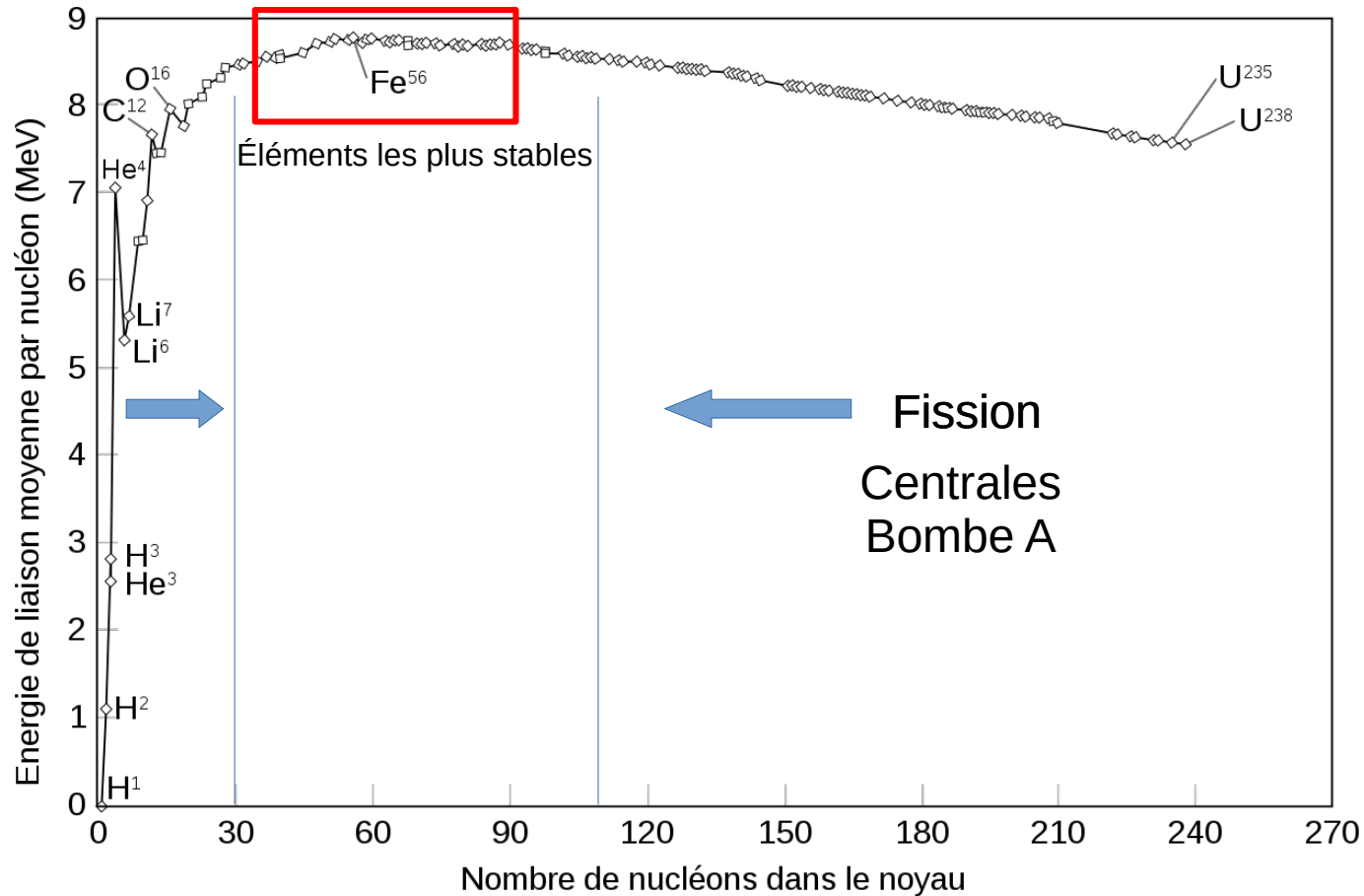
- Principe d'équivalence masse–énergie : $E = mc^2$
- **Énergie de liaison nucléaire** = défaut de masse $\times c^2$



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 ⁵

Naissance (stellogénèse)

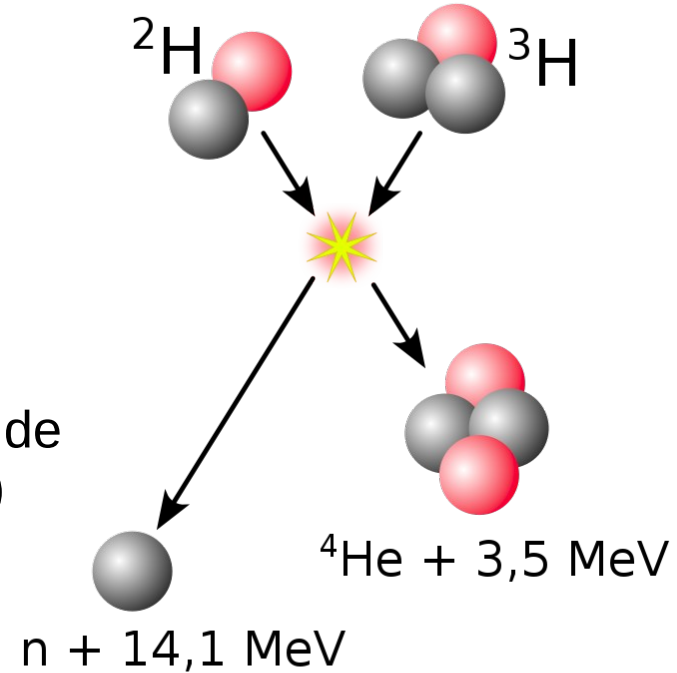
- Les étoiles se forment dans des « **pouponnières stellaires** » à partir de **nuages interstellaires** qui se contractent sous l'effet de la **gravitation**
- Lorsque la pression et la température sont suffisantes, les premières réactions de **fusion nucléaire** commencent
 - « **proto-étoiles** »
 - 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

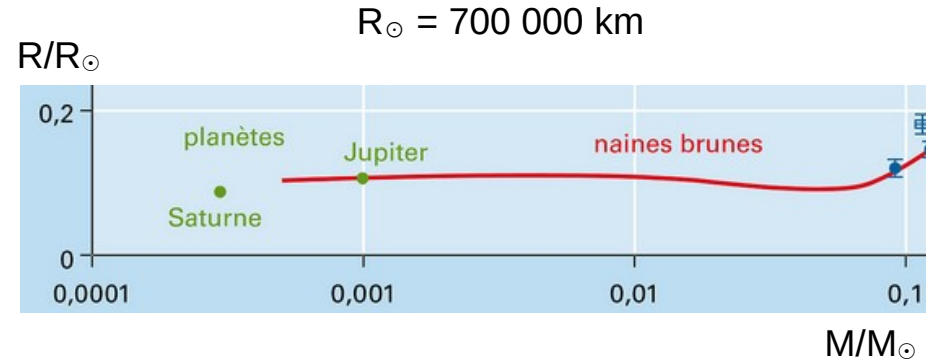
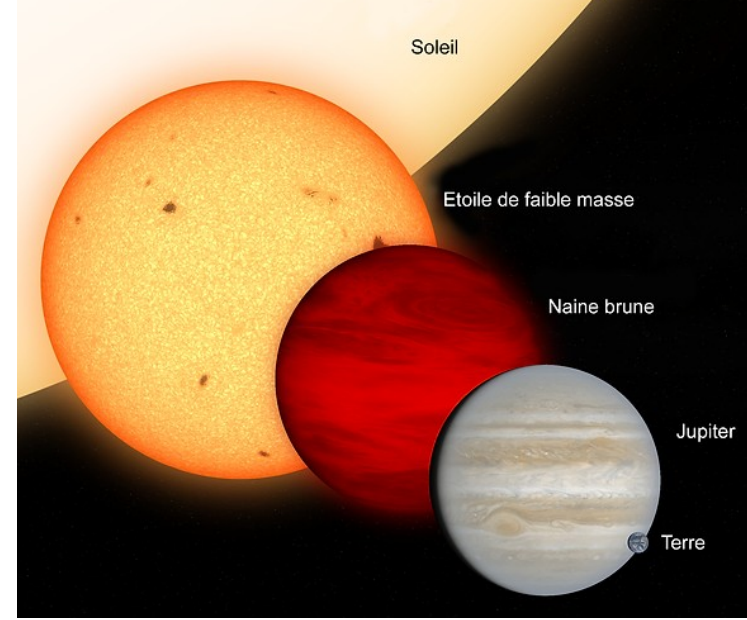
La fusion nucléaire

- 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 4×10^{26} W (400 millions de milliards de milliards de watts – 400 millions de milliards de centrales nucléaires)
 - On en reçoit une fraction de 4×10^{-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

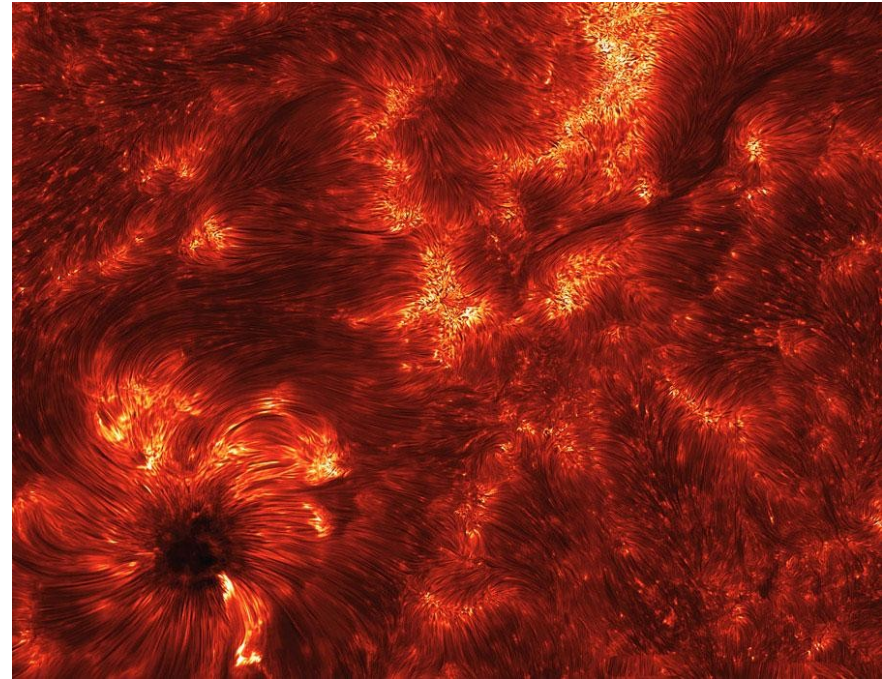
- Ou « **étoiles manquées** »
- Objet **substellaire** dont la masse est inférieure à la masse minimale nécessaire à la **fusion thermonucléaire de l'hydrogène**
 - (mais suffisante pour la fusion nucléaire du deutérium ^2H)
 - entre les planètes les plus massives et les étoiles les moins massives : $13 M_J < M < 75 M_J$ (masse jovienne : 2×10^{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)

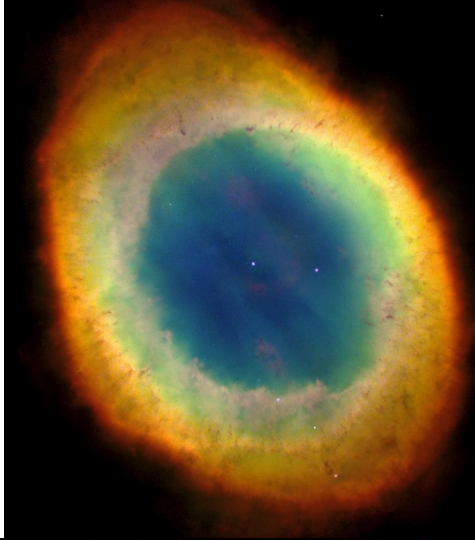
- Étoile de masse $0,3$ à $\sim 10 M_{\odot}$ qui a **terminé sa séquence principale**
 - a **épuisé** l'hydrogène de son noyau
 - a commencé la **fusion de l'hydrogène** dans la **coquille** entourant le noyau (car l'effondrement de l'étoile a repris et la T_p de la coquille a augmenté)
- Caractéristiques
 - 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

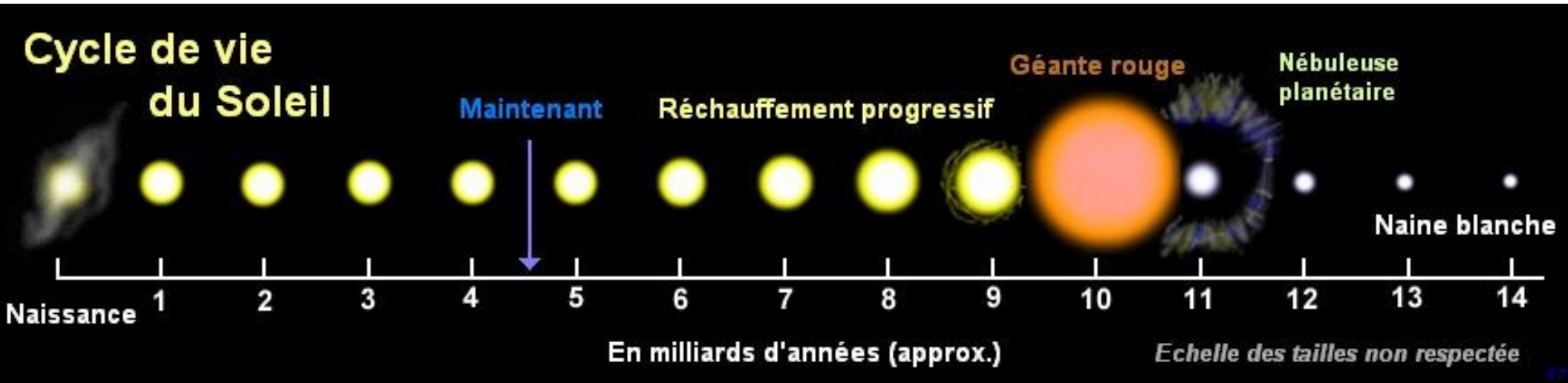
La nébuleuse planétaire de la Lyre



NGC 6751, ou nébuleuse de l'Œil étincelant

Vie du Soleil – résumé

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

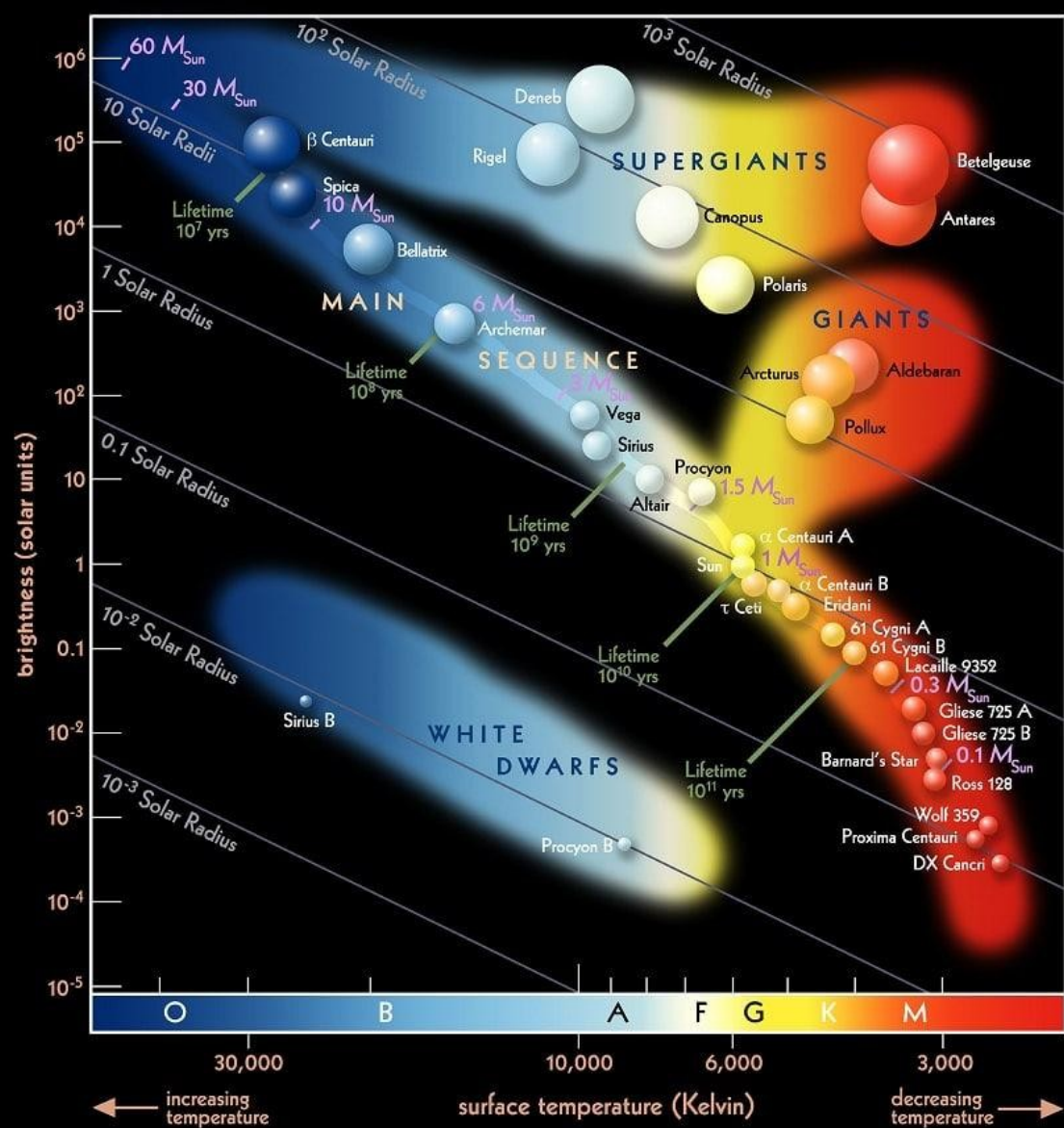


- Evolution plus rapide pour les étoiles plus massives

Le diagramme H-R

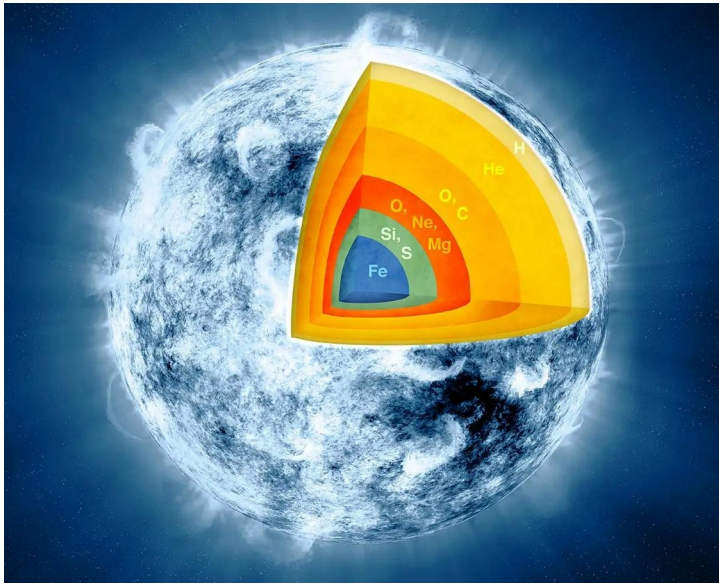
- Diagramme de Hertzprung-Russell
- Représente les différentes classes d'étoiles en fonction de
 - Température de surface
 - Luminosité

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

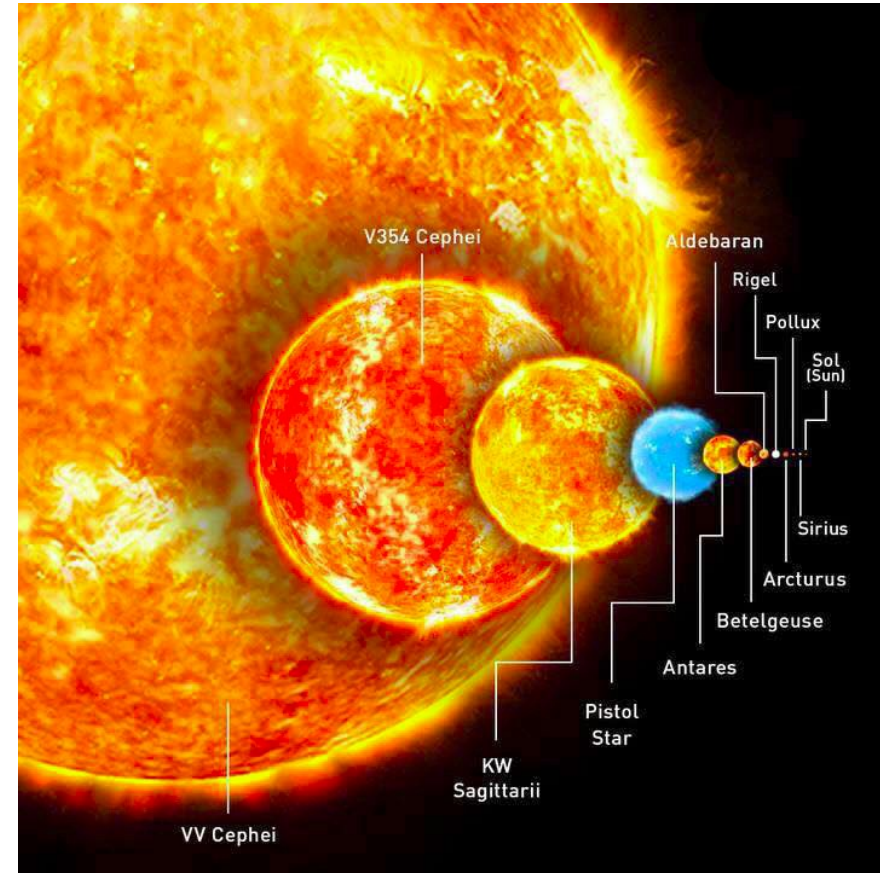


Les supergéantes rouges

- 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/astronomie-supernovae-nustar-nous-plonge-coeur-etoiles-explosion-52442/>



Fin de vie d'une supergéante

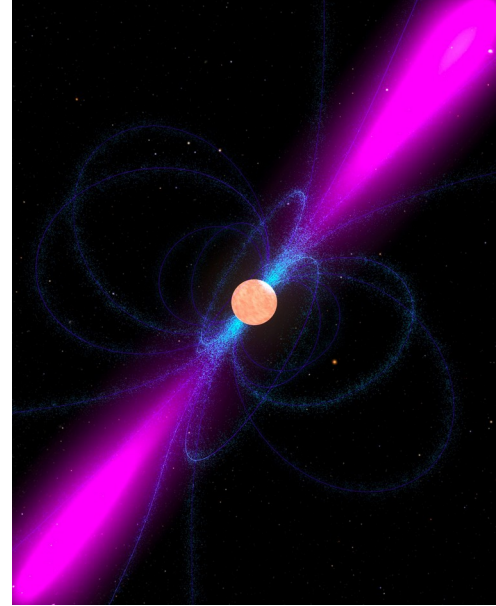
- Le fer étant l'élément le plus stable, **plus de fusion possible**
 - le **cœur de fer** n'est **plus en équilibre** (plus de force centrifuge)
 - il **s'effondre** sur lui-même : **les protons absorbent les électrons**
→ **neutrons**
- Explosion : **Supernova & sursaut gamma**
 - Expulsion des couches 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 ~ 10 km, **densité** $= 3-6 \times 10^{17}$ kg / m³ ,
 - comparable à la **densité du noyau atomique** (2×10^{17} kg / m³)
 - 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 »)



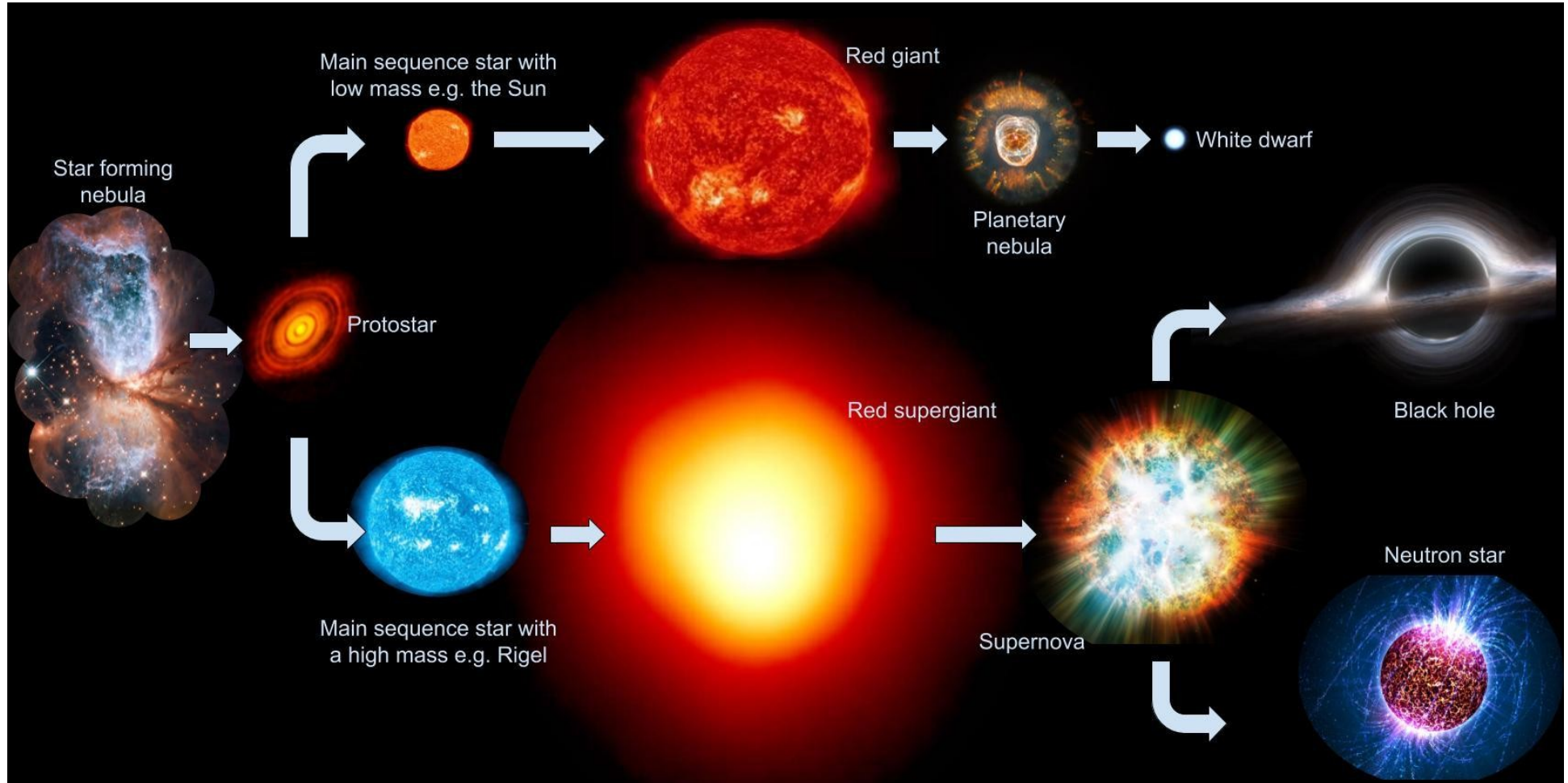
Les trous noirs

- 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 » $10\text{-}1000 M_{\odot}$ 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...)

