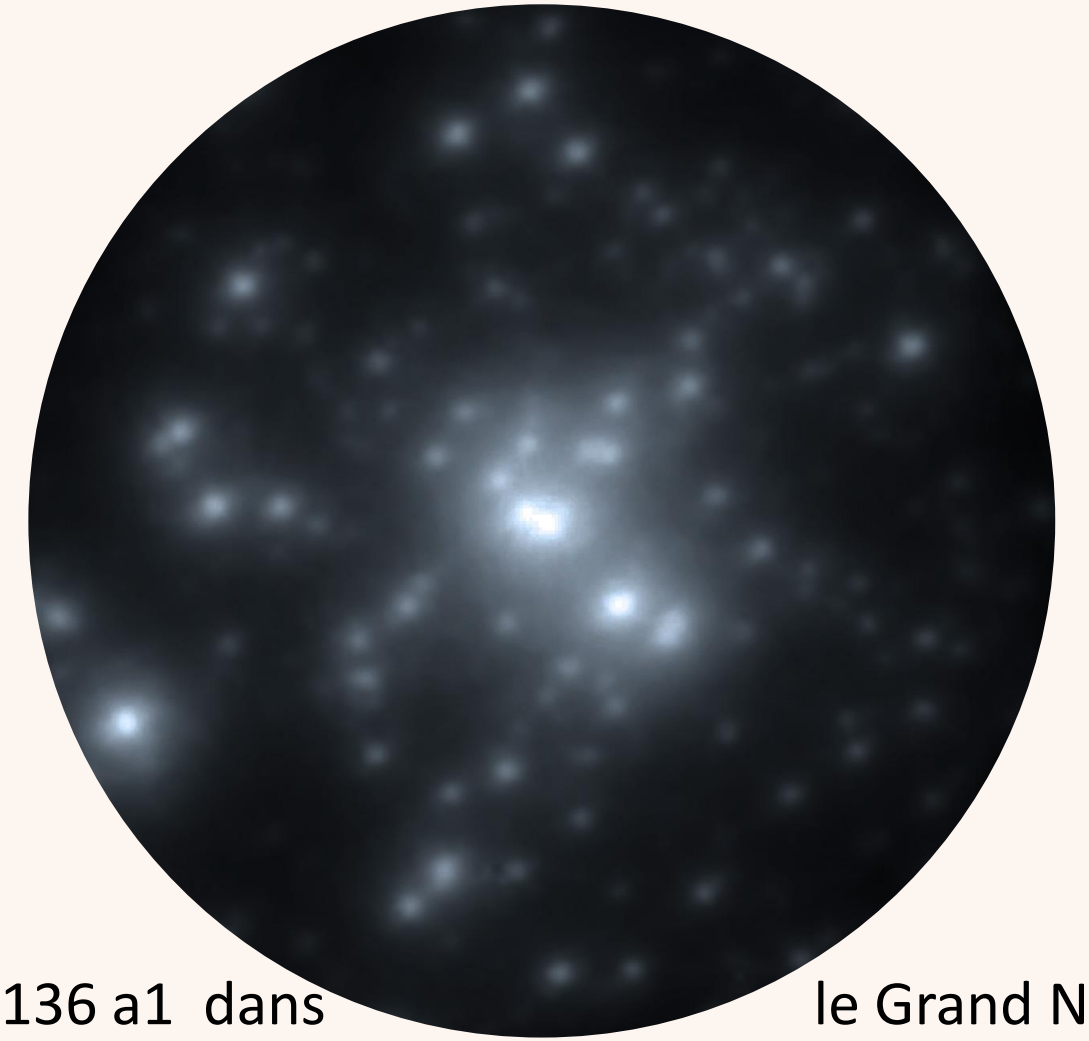
A propos des étoiles



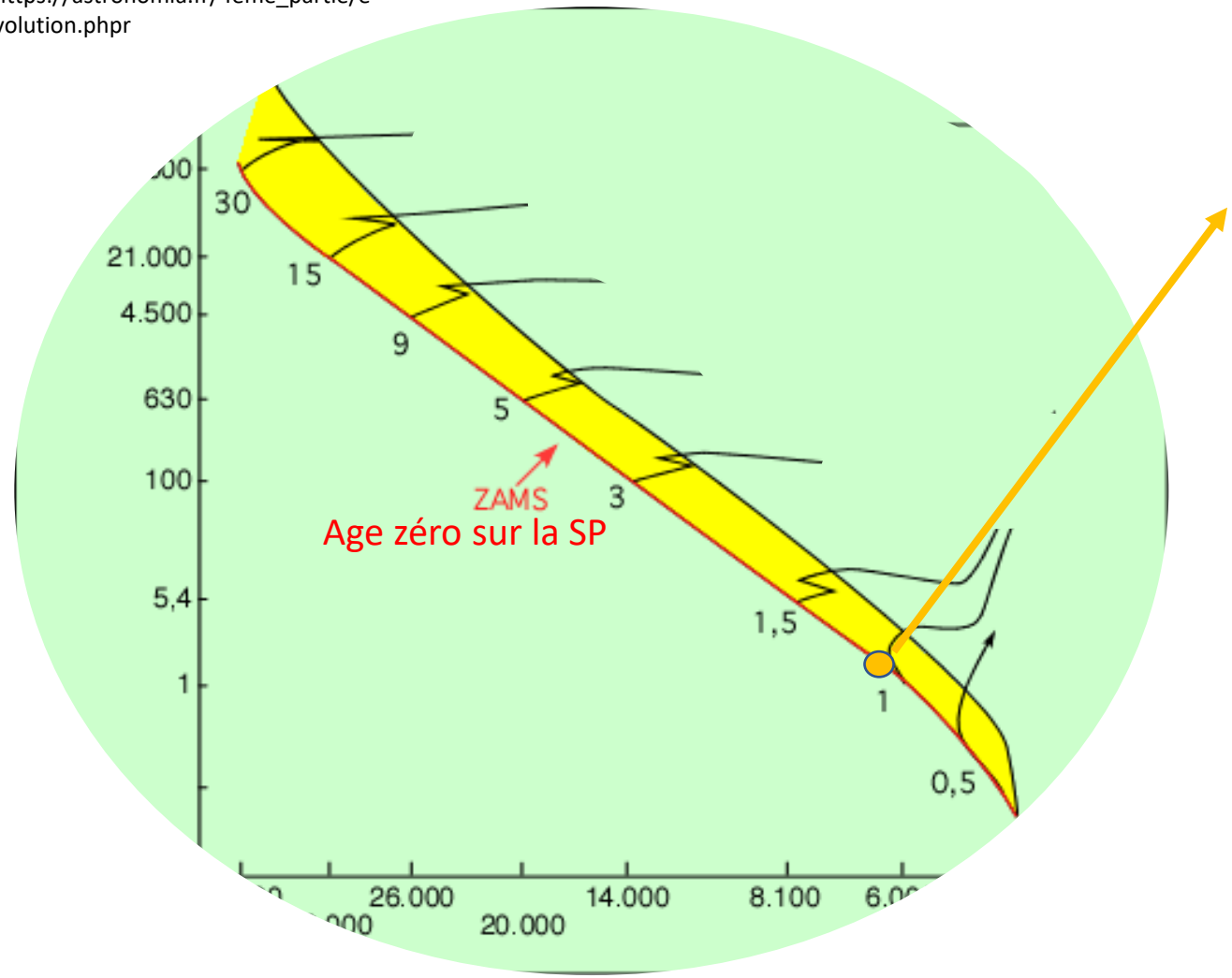
Nicole Arthaud,
31 mars 2023

R136 a1 dans le Grand Nuage de Magellan

170 $M_\odot$ < M < 230 $M_\odot$

En fait, pendant la SP …

https://astronomia.fr/4eme_partie/evolution.phpr



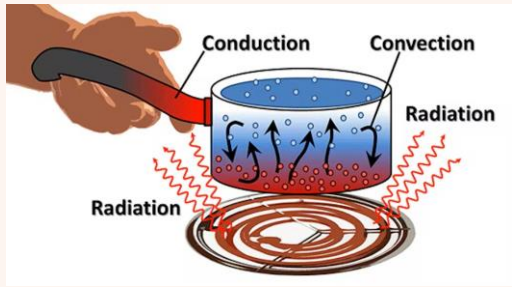
L'hydrogène brûle au centre, puis progressivement vers l'extérieur ;

D'abord : les couches externes se rapprochent du cœur, et donc se réchauffent.
Ensuite : la dilatation l'emporte sur la gravité, elles s'éloignent et se refroidissent

https://fr.freepik.com/photos-vecteurs-libre/rideaux-theatre

II Après l’observable .. Que se cache-t-il derrière les apparences ?

Les transferts de chaleur au sein de l’étoile
Convection/Radiation/Opacité
L’exemple de la naine rouge



https://www.machinedesign.com/learning-resources/whats-the-difference-between/document/21834474/whats-the-difference-between-conduction-convection-and-radiation

http://www.vikdhillon.staff.shef.ac.uk/teaching/phy213/phy213_convection.html

Transferts thermiques

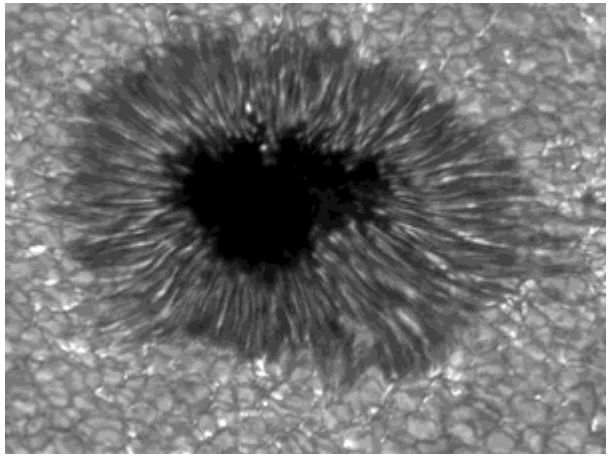
La température n'est pas uniforme dans l'étoile. Dès la naissance, elle est plus élevée vers le centre et décroît vers le pourtour.

Il y a donc des **transferts thermiques** du centre vers la périphérie.

Deux modes :

- La **convection** brasse la matière et l'uniformise.
- La **radiation** nécessite une certaine transparence du milieu, par exemple le vide.

L'opacité limite le rayonnement et favorise la convection.

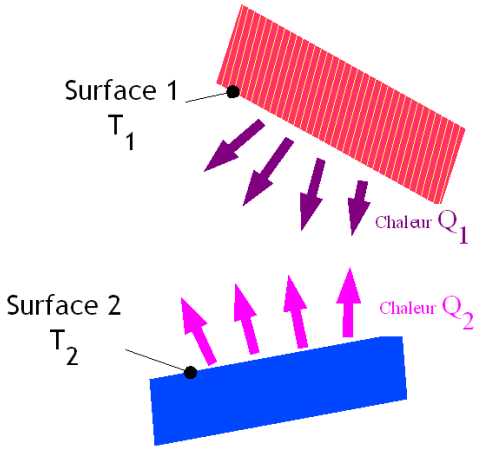


Convection autour d'une tâche solaire

Par Schillz33 sur Wikipédia anglais,

CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=47139688

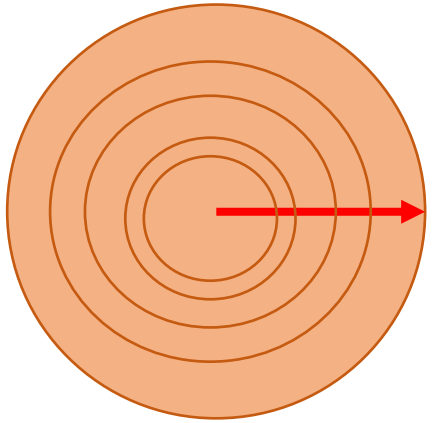
Radiation



Variations d'opacité

L'opacité augmente avec la densité mais diminue très vite avec la température.
Au sein des étoiles, l'opacité est proportionnelle à :

(Densité)/ (Température^{3,5})



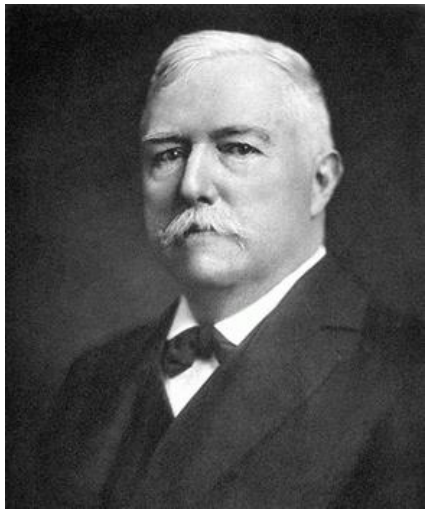
A l'équilibre, vers l'extérieur :

- Température décroissante
- Opacité **vite** croissante

Tous les phénomènes sont symétriques. Les conditions de température, d'opacité, de dégénérescence de la matière, de dilatation et de contraction contribuent à définir des zones concentriques dans l'étoile, des coquilles, réparties autour du cœur.

L'exemple des naines rouges

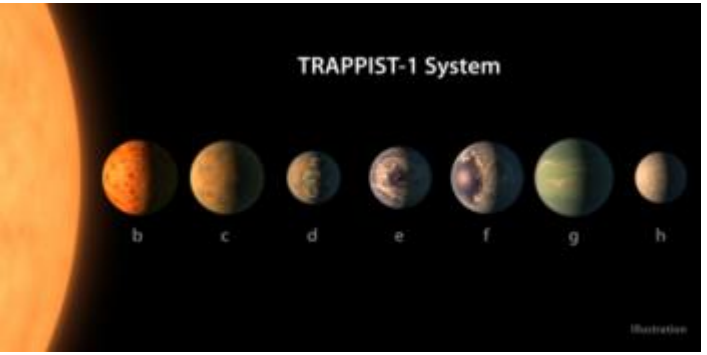
0,26 $M_\odot$ > M > 0,08 $M_\odot$



Edward Emerson Barnard
(1857 – 1923)

les plus petites
les plus discrètes
les plus fréquentes
les plus durables
les plus prévisibles
les plus monotones
des étoiles en SP

Etoile de Barnard ou
Proxima Ophiuchi
M4,0 V - 0,17 $M_\odot$



https://irfu.cea.fr/Phocea/Vie_des_labos/Ast/ast.php?id_ast=4276

Par Jens Hackmann — Jens Hackmann, CC BY-SA 3.0 de, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=17727061

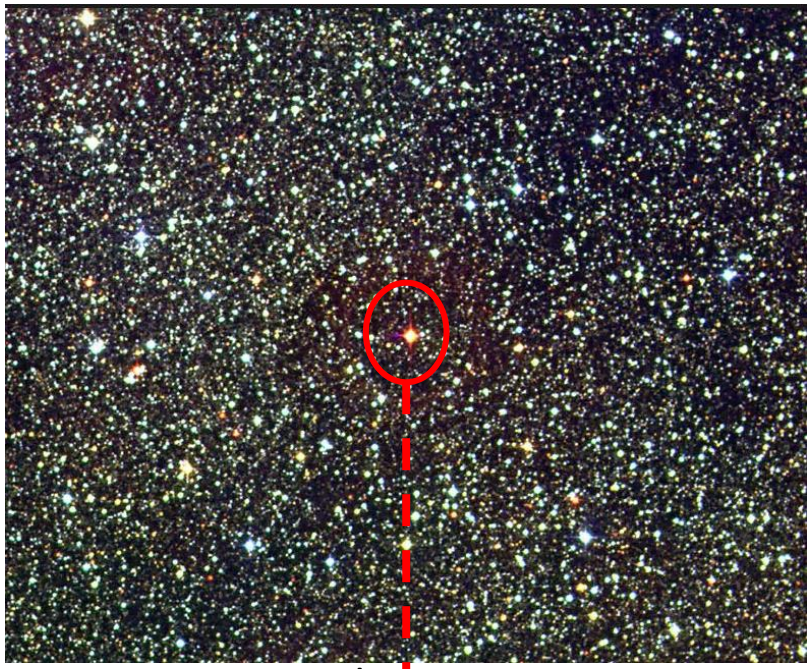
Leur vie …

Véritable étoile car elle fusionne l'hydrogène en hélium.

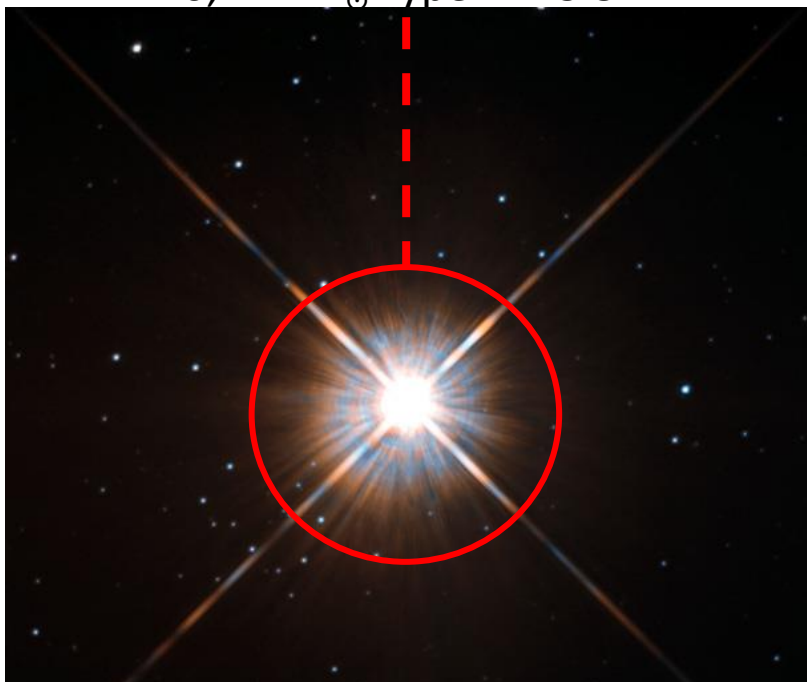
Température faible => opacité importante dans toute l'étoile.
La matière est brassée par **convection** dans son ensemble.
Le mélange hydrogène/hélium reste homogène.

Tout l'hydrogène peut être consommé.

A la fin de la SP, l'étoile est composée seulement d'hélium inerte.



Proxima du Centaure
M = 0,122 $M_\odot$ Type : M 5.5 V



Par ESA/Hubble,
CC BY 4.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=29263039

RAPPEL : Pression de Fermi ou pression quantique

L'état dégénéré de la matière se produit dans des cas de très forte densité , lorsque les électrons sont « trop rapprochés ». Ils se fuient les uns les autres de plus en plus vite.

Ceci crée **une pression** qui ne provoque **ni augmentation de température, ni augmentation de volume.**

Elle peut équilibrer la contraction.

Pour en savoir plus :

http://astronomia.fr/4eme_partie/degenerescence.php

… et leur fin !

Fin de la fusion => Fin de la pression thermique nucléaire.

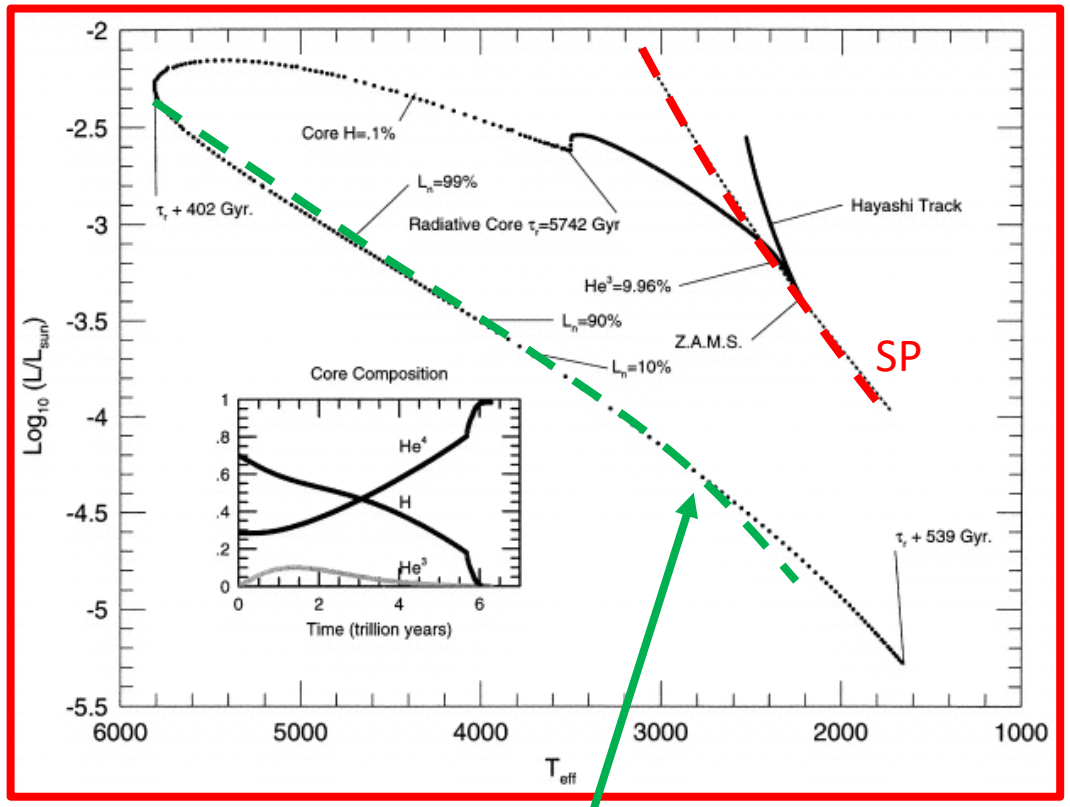
Contraction => l'étoile se réchauffe, sa densité augmente. L'enveloppe est éjectée.

La dégénérescence se produit AVANT que la température de fusion de l'hélium ne soit atteinte => la **pression quantique** s'oppose à la contraction.
Un **équilibre de Fermi** s'installe.

La pression de Fermi n'atteint pas sa limite (l'étoile est très peu massive) donc l'équilibre est durable. Il n'augmente pas la chaleur de l'étoile.

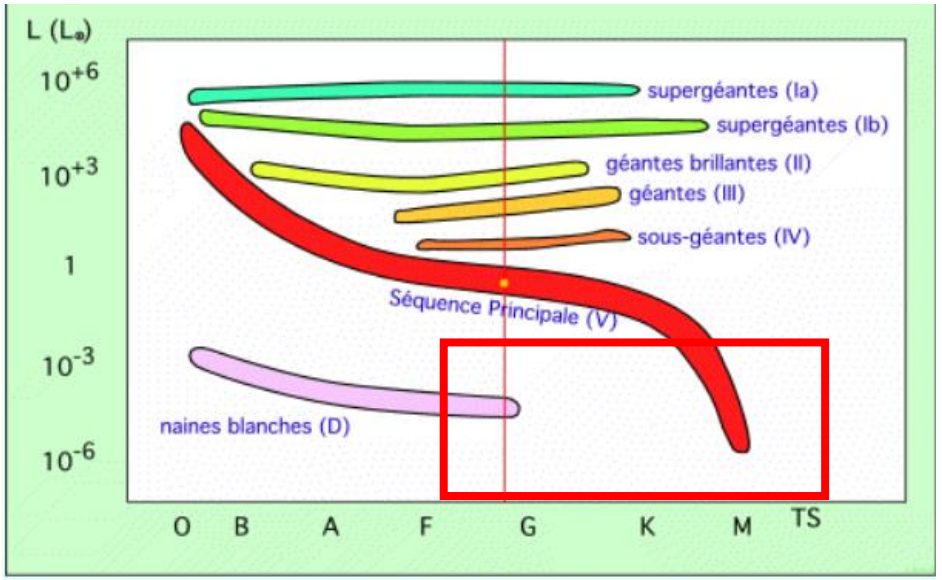
Le cœur est très dense (1T/cm^3) et très chaud au départ, d'où une couleur blanche. C'est **une naine blanche d'hélium** (naine hors SP).

Elle refroidira inexorablement jusqu'à devenir noire …. mais vous ne le verrez pas !



RED DWARFS AND THE END OF THE MAIN SEQUENCE
Fred C. Adams,1 Gregory Laughlin,2 and Genevieve J. M. Graves2

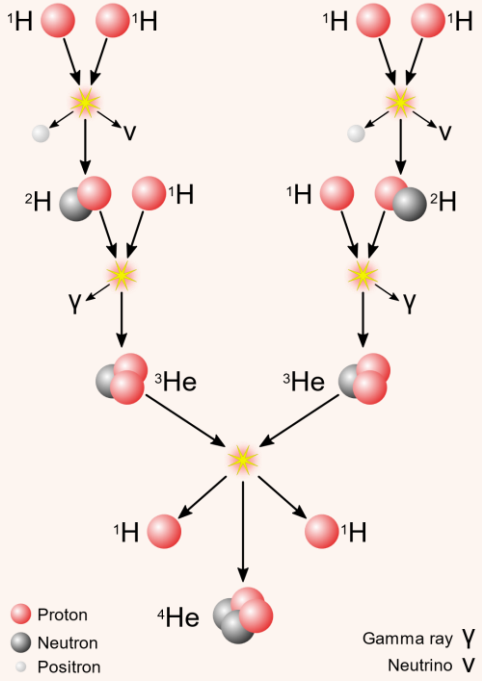
Evolution quasi iso-rayon



Les classes de luminosité

La fusion de l’hydrogène en hélium

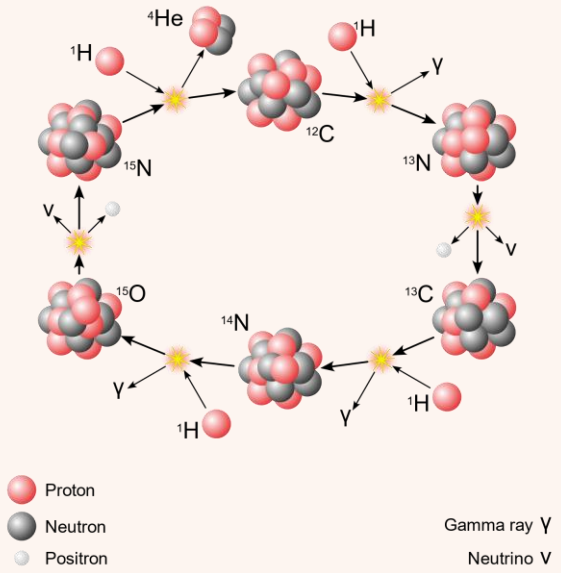
Chaine Proton-Proton / Cycle CNO



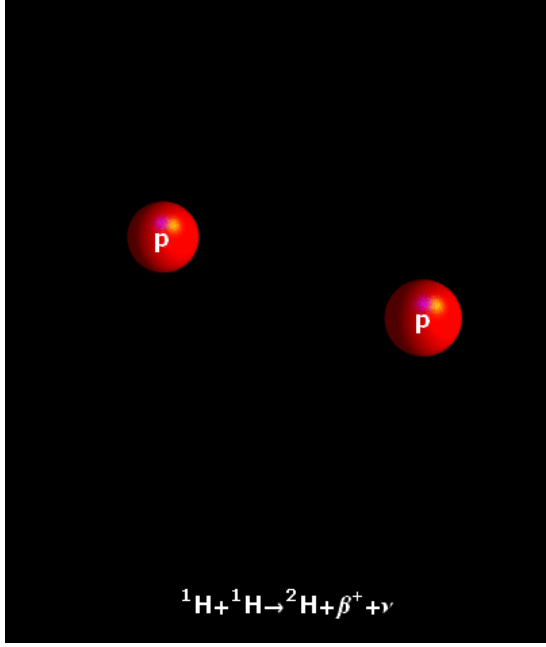
Chaine proton-proton, première variante

Wikipédia

Cycle Carbone Azote Oxygène



Deux modes distincts de fusion de l'hydrogène



http://members.wolfram.com/jeffb/visualization/proton-proton.shtml

Vers 10 MK, fusion par « **chaîne PP** ».

- Elle se déclenche à assez « basse » température, efficace vers 15 MK.
- Elle fonctionne sur une assez large plage de températures.
- Elle ne nécessite que de l'hydrogène au départ.
- Elle est moins productive que l'autre.

Vers 20 MK, déclenchement possible du « **cycle CNO** »

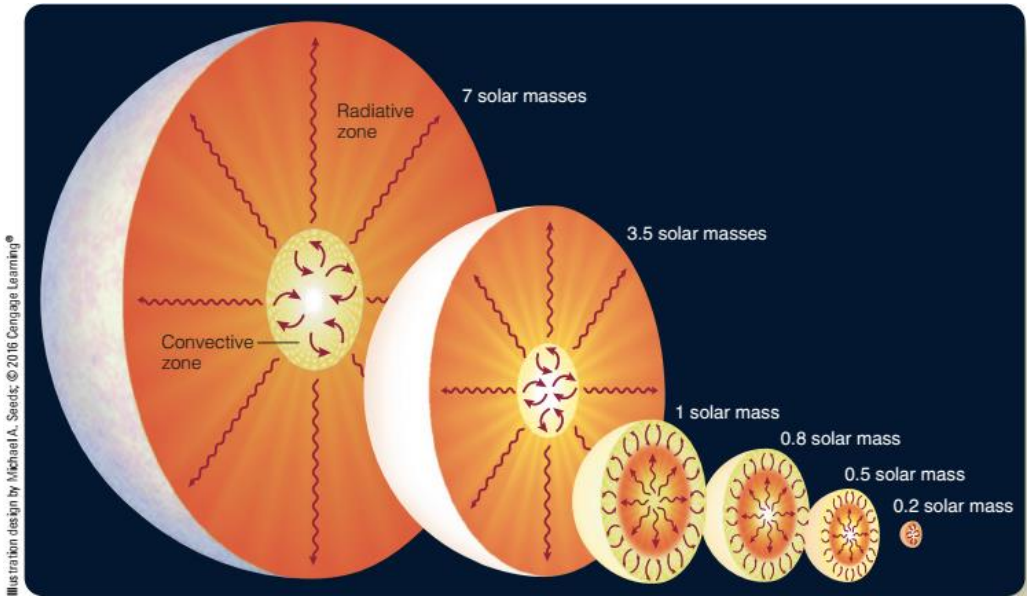
- Très productif.
- Nécessitant la présence de carbone et d'azote au départ (métallicité de l'étoile).
- Ne fonctionnant que dans certaines limites de température bien déterminées donc dans une zone réduite.

cycle CNO

Trois cas de figure selon la masse

M < 0,26 $M_\odot$ Chaine PP uniquement . Temp. centrale faible. Opacité élevée. Convection partout.

https://scienceatyourdoorstep.com/2019/11/11/what-goes-on-inside-a-star/



0,26 $M_\odot$ < M < 1,5 $M_\odot$. Chaine PP prépondérante. Gros coeur

Temp. assez forte au centre => opacité faible au centre => cœur radiatif.

Vers la surface, l'opacité augmente et bloque les radiations. Le cœur chauffe la coquille adjacente et la dilate; sa masse volumique diminue, et la poussée d'Archimède entraîne son ascension vers l'extérieur de l'étoile. La convection est déclenchée => fine enveloppe convective.

1,5 $M_\odot$ < M . Cycle CNO prépondérant. Petit coeur

L'énergie est produite dans une toute petite zone. Elle ne peut pas être évacuée par radiation => cœur convectif

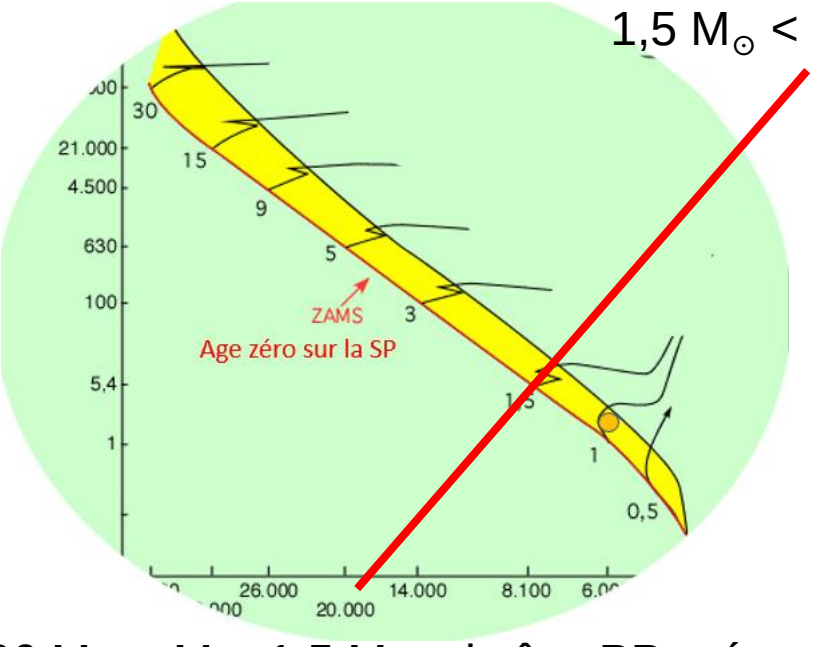
Vers l'extérieur, température encore haute => opacité faible : la radiation prend le pas => épaisse enveloppe radiative.

Pendant la SP, différents profils …

Cœur convectif ⇒ mélange Hydrogène en fusion, Hélium inerte homogène dans le cœur.

D'abord : le cœur se contracte dans son ensemble / l'enveloppe se dilate, **<u>le tout très lentement</u>.**
Ensuite : fin de l'hydrogène dans le cœur ⇒ **contraction <u>rapide</u>** sous la pression ⇒ la fusion se déplace vers l'extérieur ⇒ élévation de la température superficielle.
Enfin : la fusion atteint la zone de température limite, la production d'énergie diminue ⇒ la contraction gravitationnelle reprend ⇒ la température du cœur monte vite, chauffe les couches externes qui se dilatent.

1,5 $M_\odot$ < M , cycle CNO prépondérant

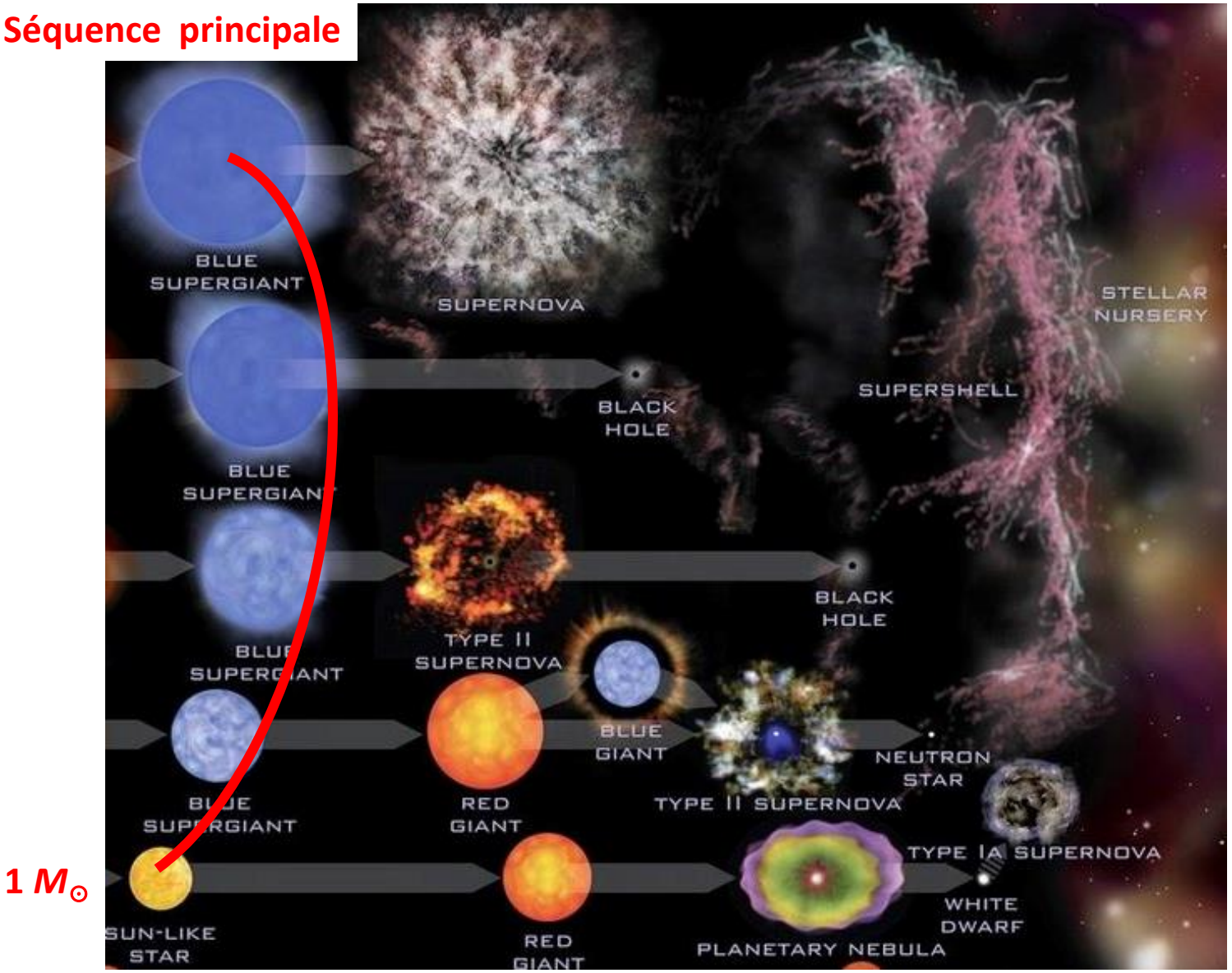


0,26 $M_\odot$ < M < 1,5 $M_\odot$, chaîne PP prépondérante

III Après la séquence principale à chacune son destin

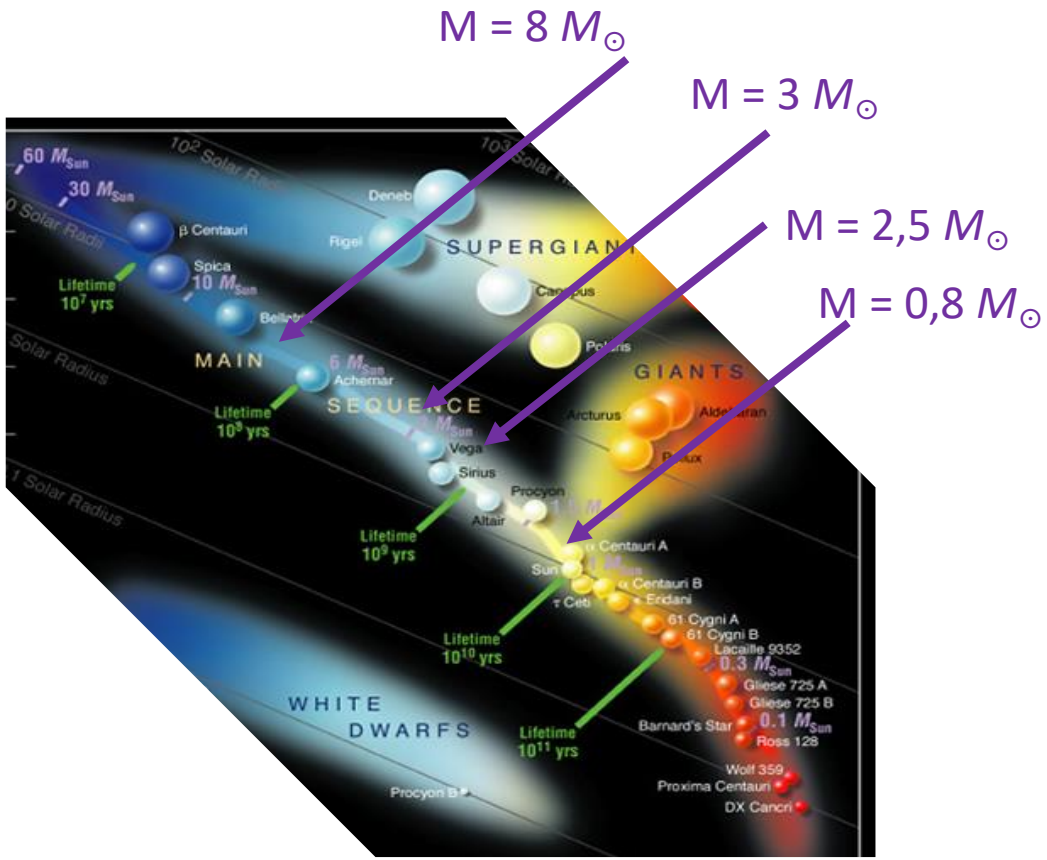
Plusieurs cas de figures selon la masse initiale

Au seuil de leur nouvelle vie, ces étoiles ont un cœur plus ou moins important formé d'hélium inerte, entouré d'une zone d'hydrogène aussi inerte. Le pourtour a déjà commencé à se dilater.



https://www.universetoday.com/24629/life-cycle-of-stars/

Quelques seuils importants



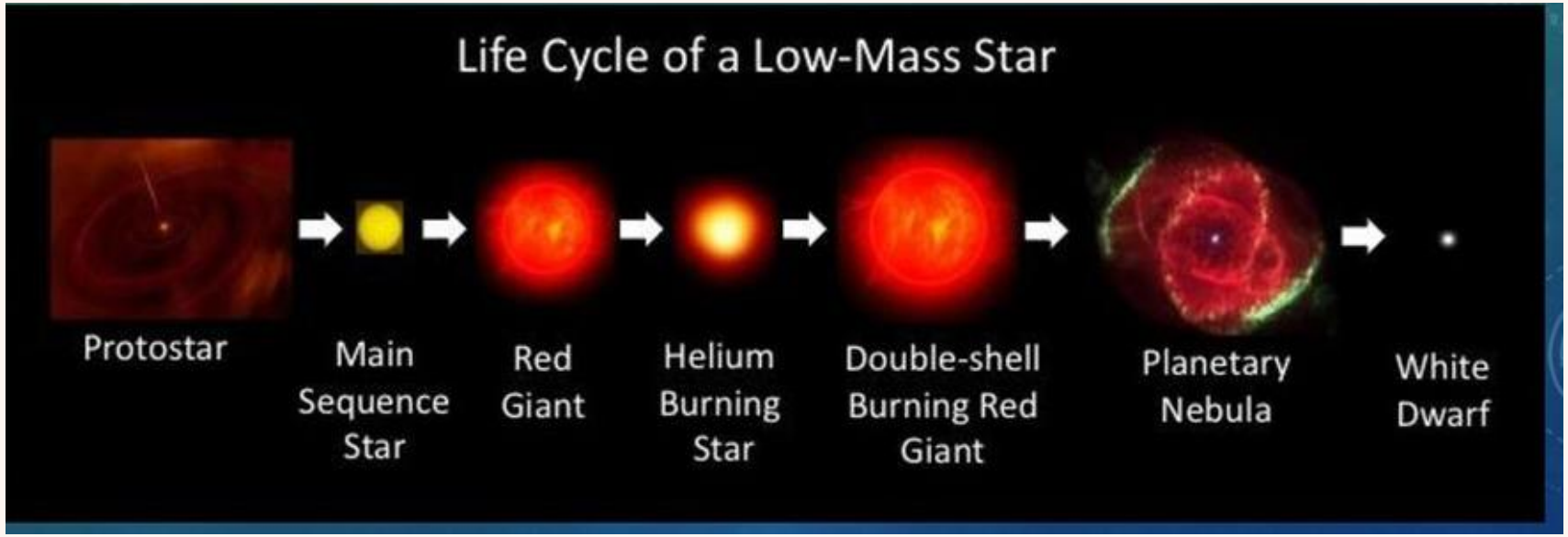
Etoiles très massives : M > 8 $M_\odot$. Nous verrons un exemple de 20 $M_\odot$.

Etoiles peu massives : 0,8 $M_\odot$ < M < 8 $M_\odot$

L'hélium peut fusionner en carbone et oxygène.

- A partir de 3 $M_\odot$ le carbone peut aussi fusionner.
- En dessous de 2,25 $M_\odot$, étoiles type soleil : l'hélium devient dégénéré avant de pouvoir fusionner. Ni le carbone, ni l'oxygène ne peuvent fusionner. Nous en verrons un exemple.

Une étoile de type soleil



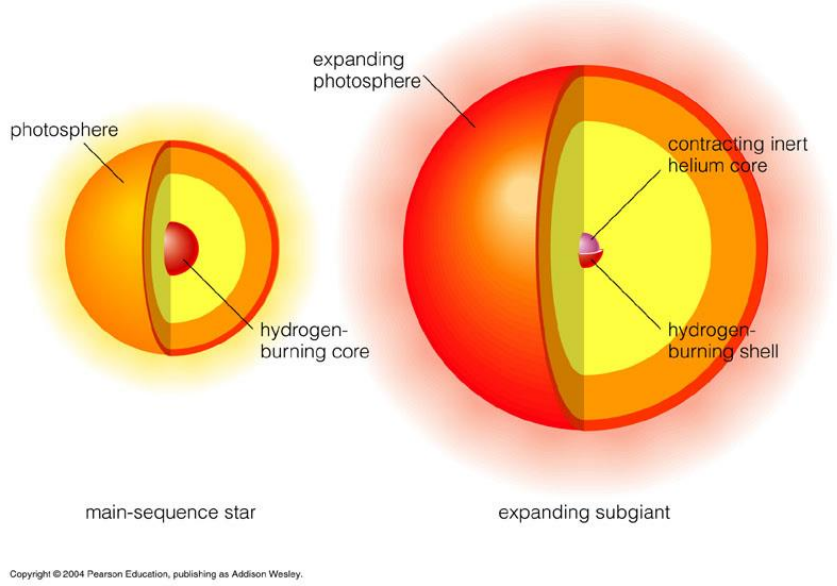
Première phase – vers le flash de l'hélium

Fin de combustion => reprise de la contraction du cœur. C'est le **départ de l'ascension vers les géantes rouges**.

https://www.physast.uga.edu/~rls/astro1020/ch17_4thed/ovhd.html

- Contraction du cœur => énergie thermique.
- Apparition d'une fine coquille d'hydrogène en fusion sur le pourtour du cœur => énergie thermonucléaire.
- Energie => des couches de gaz sont expulsées vers l'extérieur.

L'enveloppe de l'étoile se dilate, elle perd en densité et en température. Elle rougit. L'étoile devient une **sous-géante**.



Dans 5 milliards d'années, le Soleil se transformera en sous-géante rouge puis en géante rouge et incorporera l'orbite de la Terre.

Crise – le flash d’hélium (version débutant)

L’hélium du cœur devient de plus en plus concentré, puis **dégénéré** malgré la température élevée. Le cœur est à l’**équilibre** grâce à la pression de Fermi et **isotherme**.

Mais la température monte assez pour amorcer de la fusion de l’hélium, **celle-ci se propage à tout le cœur d'hélium dégénéré**. Comme la pression ne change pas, la fusion s’emballe…

Ceci dure quelques secondes, mais produit une puissance comparable à une galaxie tout entière.

Lorsque l'énergie thermique dégagée suffit pour que le cœur ne soit plus dégénéré, donc plus isotherme, la loi des gaz parfaits s’applique à nouveau, et la température élevée entraîne une brusque dilatation ! Ceci produit une explosion dans le cœur. C’est **le flash de l’hélium.**

L’étoile SAO 24457 au centre de la nébuleuse de la Raie est un cas unique pour les astrophysiciens : ils l’ont vu se réchauffer de 40 000° pendant 30 ans avant qu’elle ne se mette à refroidir de 10 000°. Ceci confirmerait une étape clef des théories d’évolution stellaire : le flash de l’hélium.

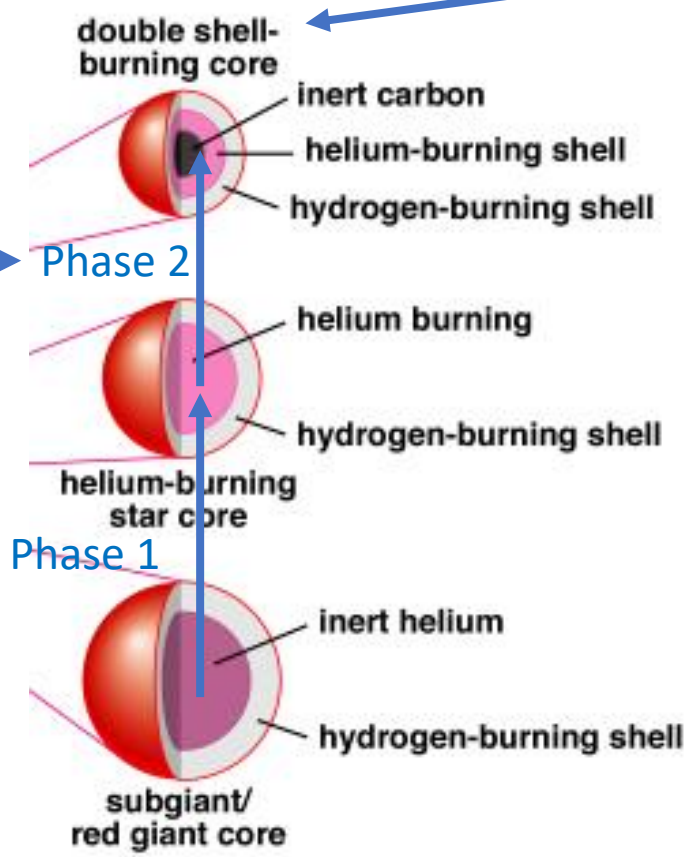
https://esahubble.org/videos/heic1618a/

https://fr.wikipedia.org/wiki/Flash_de_l%27h%C3%A9lium

Deuxième phase – Fusion de l'hélium

Dans le cœur : hélium en fusion et carbone+ oxygène inertes. L'hydrogène continue à brûler sur la coquille adjacente et à alimenter le cœur en hélium.

Les réactions assurent l'équilibre de l'étoile. Sa luminosité provient à la fois des deux fusions. La chaleur augmente beaucoup.



Petit à petit, l'étoile se constitue un cœur de C et O, à l'intérieur d'une coquille d'hélium fusionnant en carbone et oxygène, et d'une coquille d'hydrogène qui fusionne en hélium.

Cette phase prend fin lorsque l'hélium central est épuisé. Il reste alors deux coquilles distinctes en fusion autour d'un cœur inerte (C et O). Une nouvelle phase s'amorce.

Troisième phase – vers la nébuleuse planétaire

- Pendant un temps les deux coquilles continuent à brûler. Elles migrent lentement vers l'extérieur, parfois s'éteignent et se rallument, d'où les pulsations thermiques.

- Les couches extérieures subissent un échauffement considérable, qui confère au gaz de grandes vitesses d'agitation thermique. L'enveloppe est très loin du cœur et subit une gravité faible, le vent stellaire devient violent.

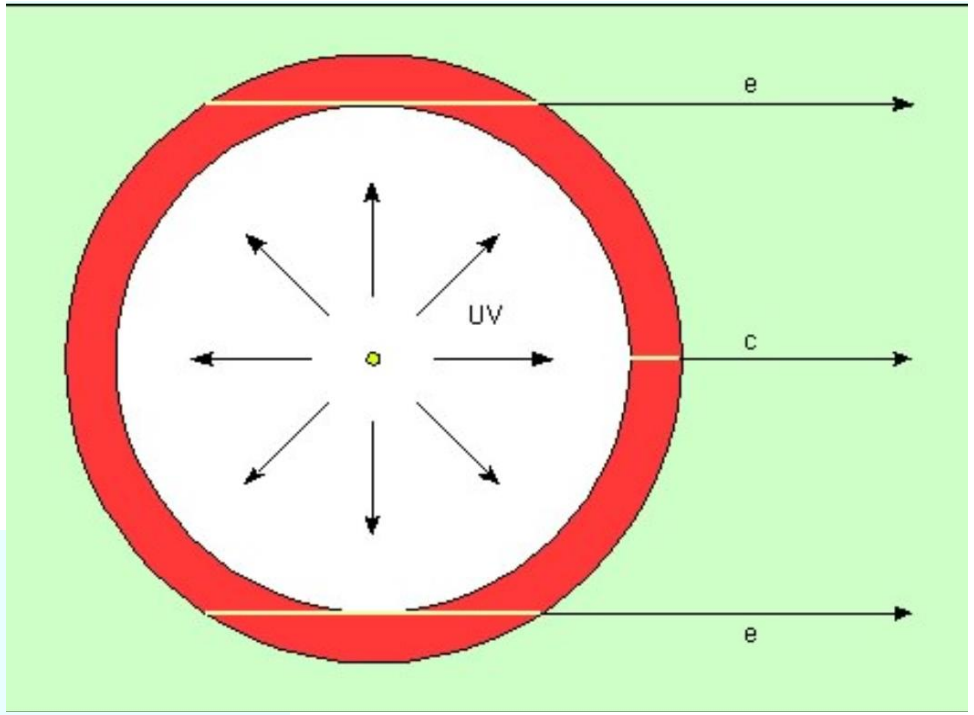
Par Jschulman555 — Travail personnel, CC BY-SA 3.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=31200678

La Nébuleuse du Croissant est une bulle de vent stellaire formée par les vents stellaires occasionnés par l'étoile Wolf-Rayet WR 136

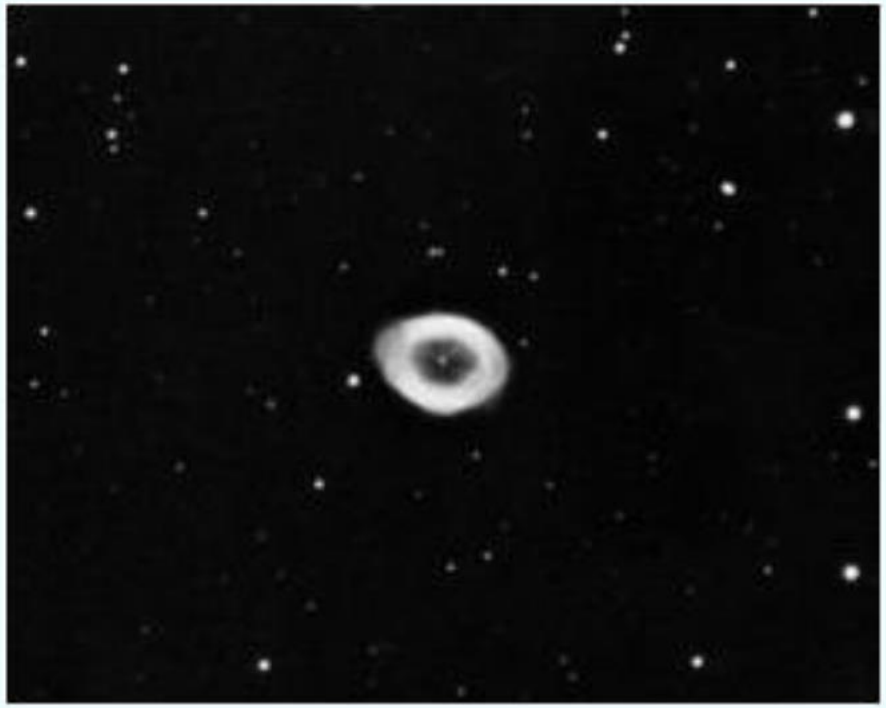
Bouquet final – la nébuleuse planétaire

- Le rayon de l'étoile est multiplié par 100 depuis la SP : **géante rouge.**
- Mais l'enveloppe devient transparente en s'évaporant : l'observation atteint des couches plus profondes, plus chaudes, **plus bleues**.
- La matière éjectée se répand dans l'espace, en conservant la symétrie sphérique. Il se crée une enveloppe en expansion autour de l'étoile. Elle est fortement chauffée par le cœur de l'étoile qui est presque à nu, très chaud, et qui émet énormément d'ultra-violets. L'enveloppe éjectée absorbe ces ultra-violets, et réémet de la lumière visible, par laquelle elle brille. C'est une fluorescence.
- Elle dure quelques milliers d'années.

Elle est perçue comme un anneau d'où son nom trompeur

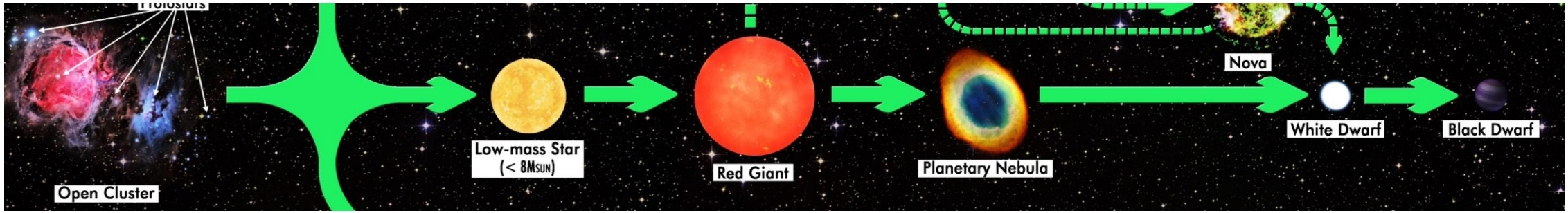


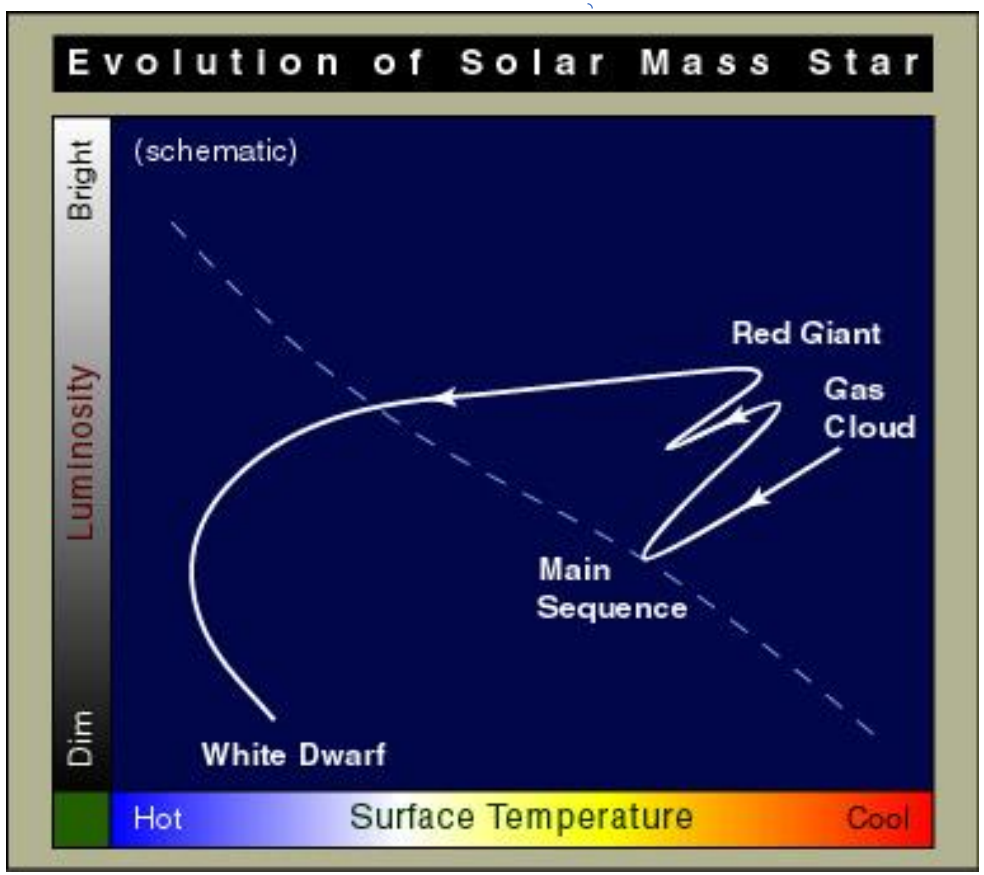
https://astronomia.fr/4eme_partie/evolution.php



Nébuleuse planétaire de la Lyre M57, lunette de 155 mm, pose 30 mn photo J.P. Bousquet

La fin - naine blanche de carbone

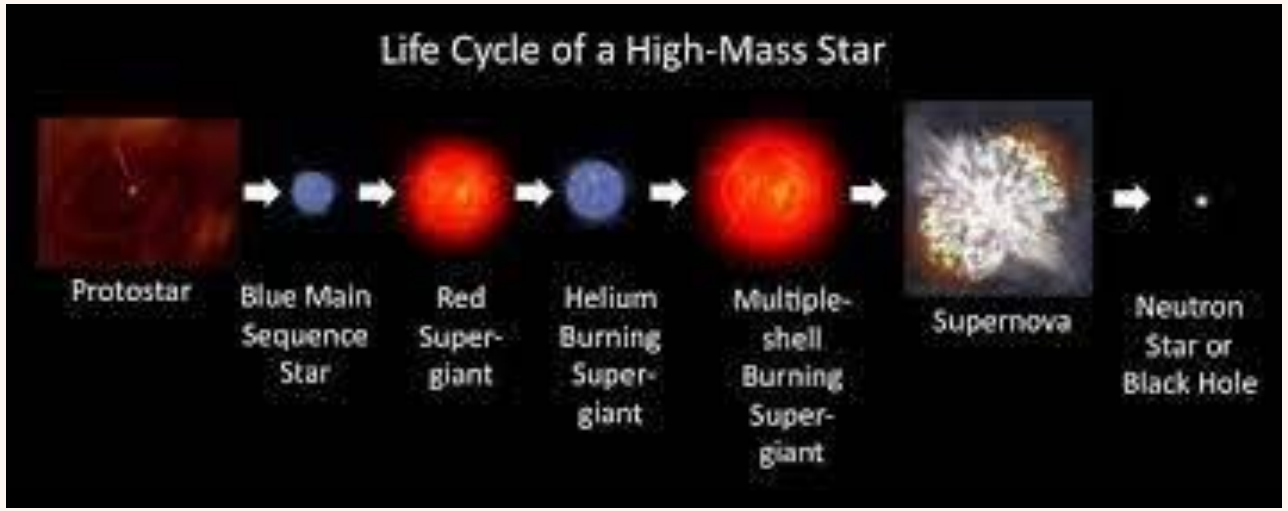




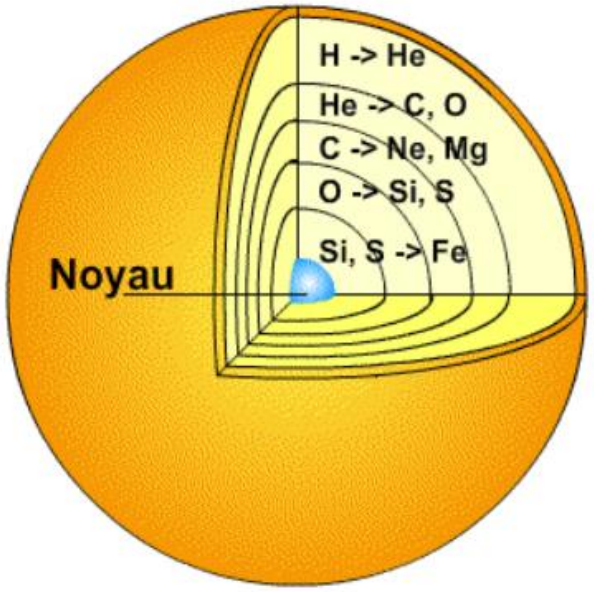
https://www.lcsd.gov.hk/CE/Museum/Space/archive/EducationResource/Universe/framed_e/lecture/ch15/ch15.html

La température de fusion du carbone ne sera jamais atteinte.
Le cœur se contracte jusqu'à ce qu'un équilibre de Fermi soit atteint ….

Exemple d’étoile massive (20 $M_\odot$)



Etoiles très massives : exemple avec 20 $M_\odot$
fusion en pelures d'oignon



Structure dite en «pelure d'oignon» d'une supergéante juste avant l'effondrement du cœur de fer et l'explosion de la supernova.

Crédit : ASM/Noël Robichon et Gilles Bessou

Durée de vie du carburant pour 20 $M_\odot$

Carburants principaux	Durée de vie de la fusion
Hydrogène	10M années
Hélium	1M années
Carbone	300 ans
Néon	0,5 an
Silicium	0,01 an

De plus en plus lourd, de plus en plus vite

https://media4.obspm.fr/public/ressources_lu/pages_vie-mort/bb-massives.html

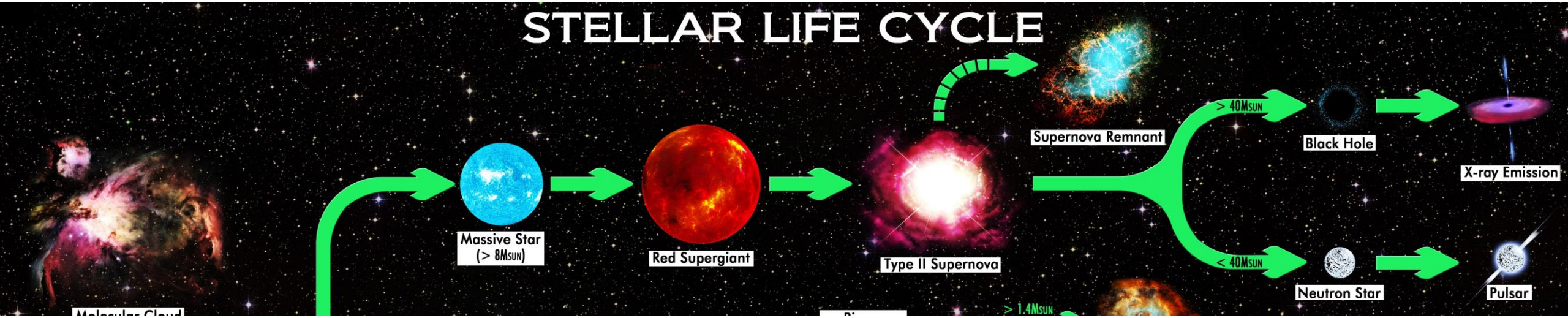
Une spirale infernale

Lorsqu'une quantité suffisante de fer est amassée dans le cœur : toute tentative de fusion du fer consomme de l'énergie et donc

- Diminution de la température du cœur
  - Diminution de la pression dans le cœur
    - La gravité permet une contraction du cœur
      - Qui augmente la densité
        - Qui augmente les tentatives de réactions …
          - Qui diminuent la température …

Escalier Borromini, palais Barberini, Rome

En une fraction de seconde, le cœur s'effondre (p. ex. rayon de 6000 à 50 km), et donne une supernova. Les électrons et les protons ainsi compactés forment des neutrons et produisent des neutrinos. La pression de Fermi entre en jeu et bloque la contraction. On obtient une étoile à neutron.

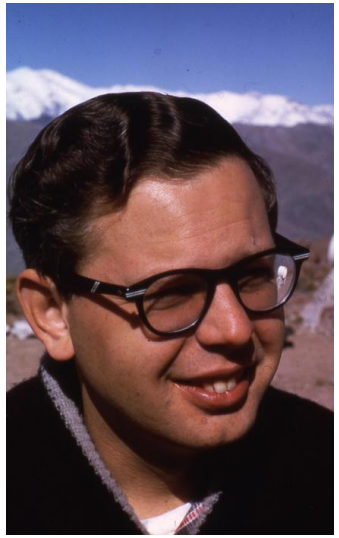


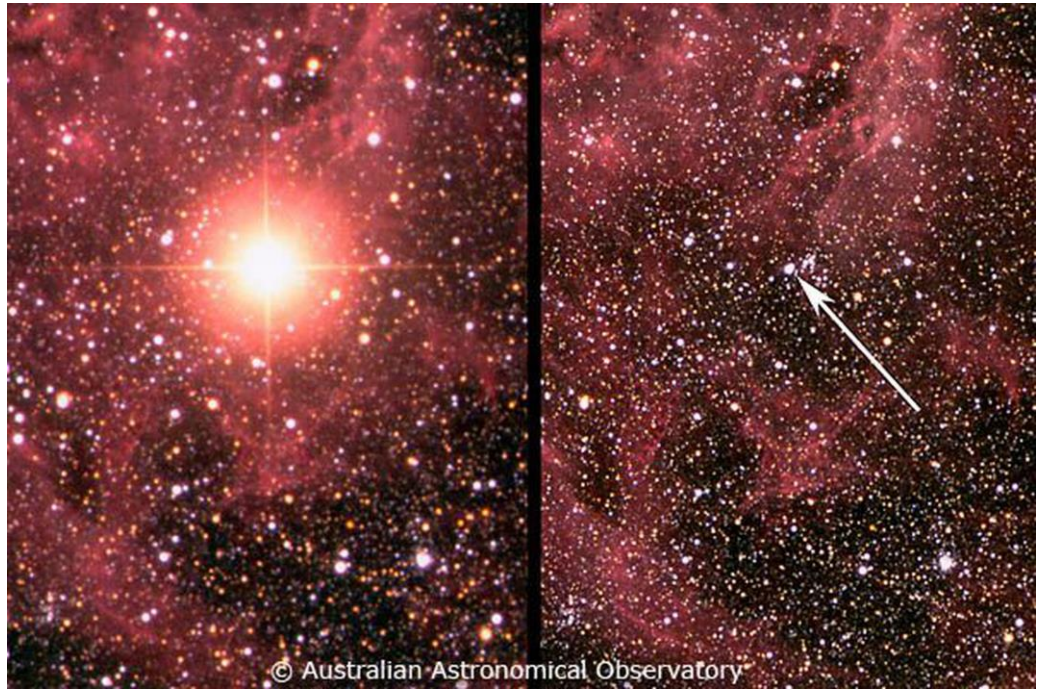
By R.N. Bailey - Own work, CC BY 4.0, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=59672008

L’exemple de feu Sanduleak 69-202a

Sanduleak -69° 202a, en abrégé **SK-69 202**, était une supergéante bleue située dans le Grand Nuage de Magellan. Née il y a 10 milliards d'années et 20 fois plus massive que le Soleil, SK-69 202 a explosé en **supernova en 1987** et est désormais connue sous le nom de **SN 1987A**.

Nicholas Sanduleak
Astronome américain,
d’origine roumaine
1933-1990



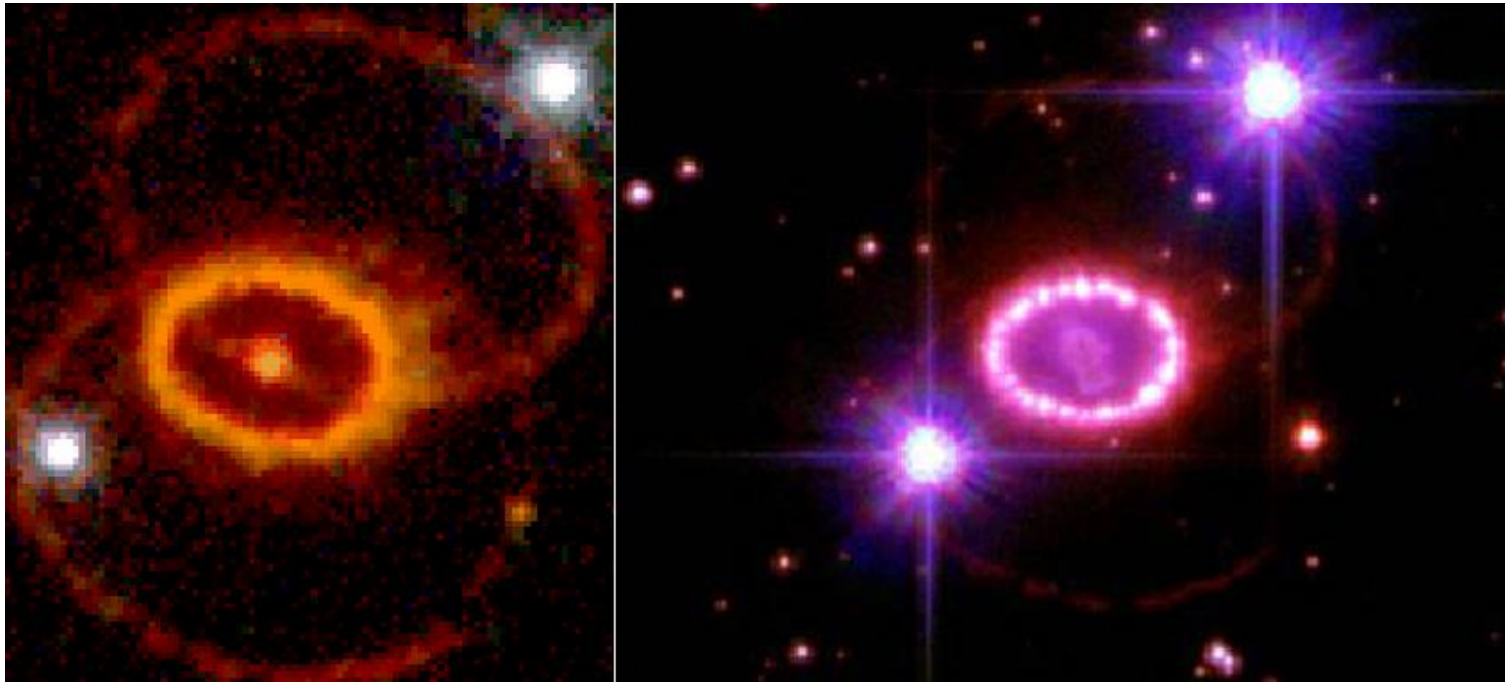


https://www.jwst.fr/2017/03/la-supernova-sn-1987a/

SN 1987A vue avec le HST

Un système de 3 anneaux autour de la supernova fut découvert en **1991** (à gauche); l'onde de choc produite par l'explosion atteignit l'anneau équatorial intérieur en **1993**, ce qui forma au fil des années un magnifique collier de perle! (l'image de droite date de **2009**). L'intensité lumineuse de ce collier a commencé à décroître à partir de **2014**, lorsque l'onde de choc passait au-delà de l'anneau.

Certains astronomes pensent avoir identifié l'étoile à neutron résiduelle.

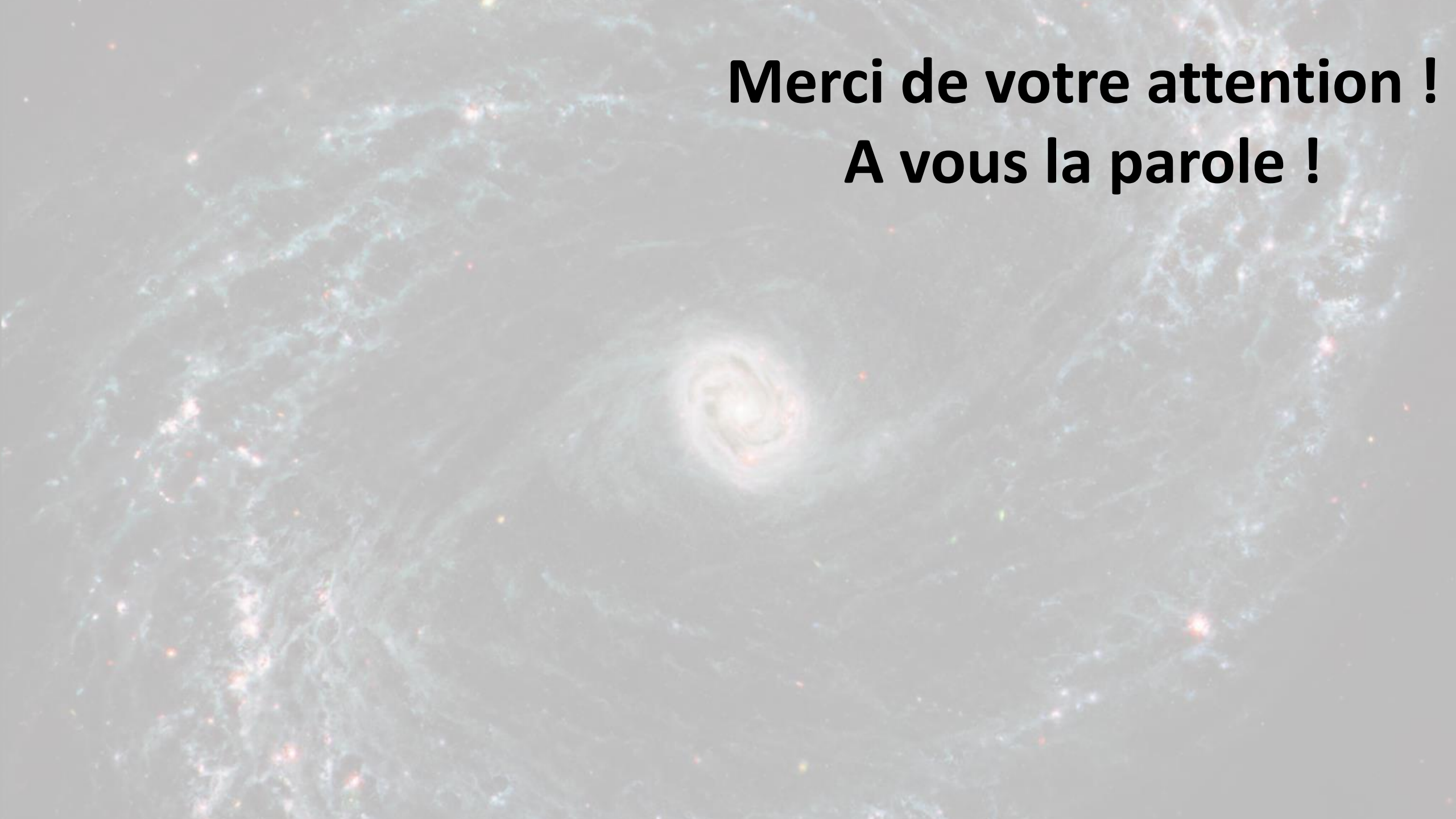


https://www.youtube.com/watch?v=XzaYNOKK6Xk

https://www.youtube.com/watch?v=ITvAdZzNFb0

https://www.jwst.fr/2017/03/la-supernova-sn-1987a/

https://www.jwst.fr/2017/03/la-supernova-sn-1987a/



Merci de votre attention !
A vous la parole !