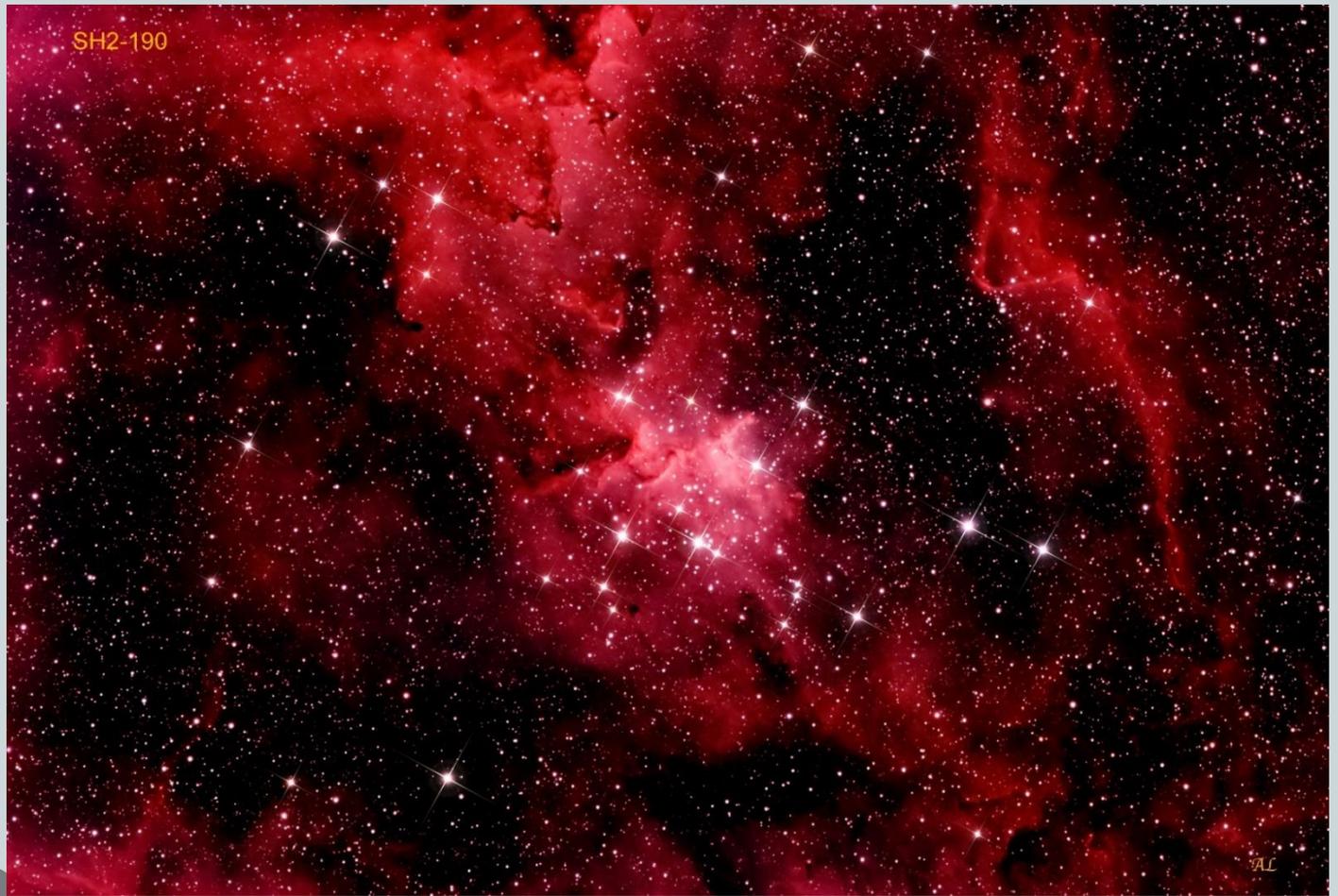


SH2-190

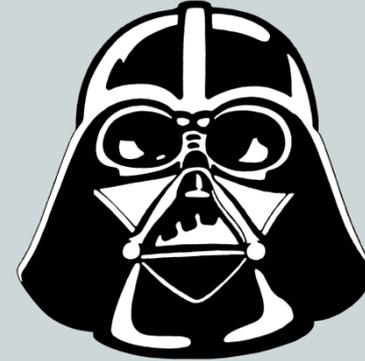


# ASTRONOMIE

## EVOLUTION FINALE DES ÉTOILES - REV.2

09/2024 Alain Liguire



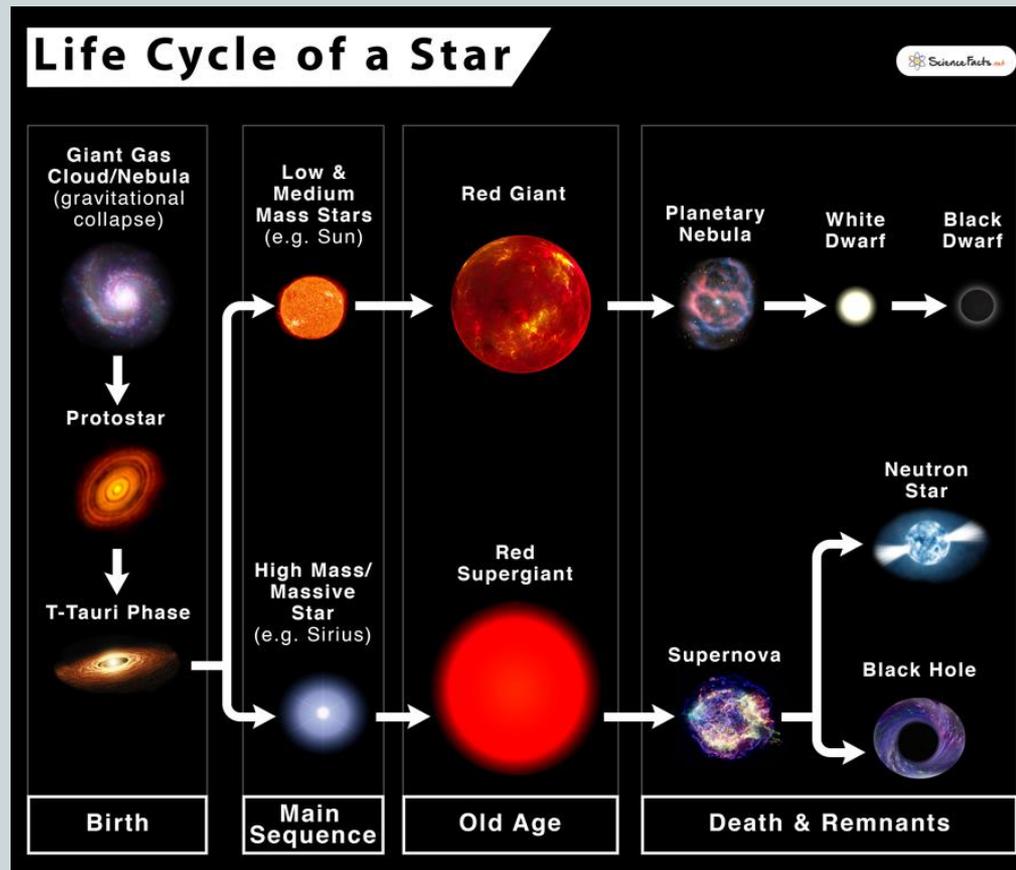


- Cet exposé fait partie d'une trilogie :
  - 1) " Evolution finale des étoiles "
  - 2) " Les étoiles à neutrons "
  - 3) "Les trous noirs "

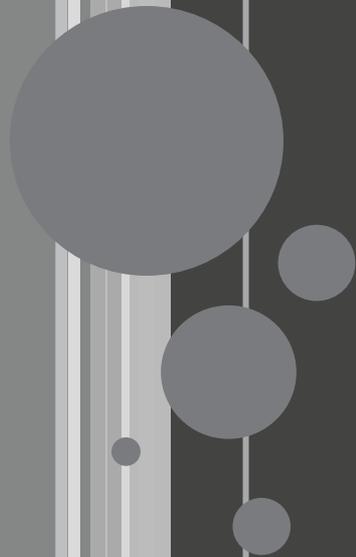


# INTRODUCTION

- **Naissance** : Les étoiles naissent à partir de l'effondrement gravitationnel d'un immense nuage de gaz et de poussière (*la nurserie stellaire*) qui va provoquer l'apparition de cœurs protostellaires. Ceux-ci vont à leur tour se contracter et former des étoiles..
- **Vie** : Au cœur des étoiles, la réaction de fusion de l'hydrogène en hélium se poursuit. Cette période importante s'inscrit dans la « **Séquence principale** »
- **Déclin** : A cours de carburant ( l'hydrogène), les étoiles vont alors suivre une évolution finale en fonction de leur masse => **c'est l'objet de cet exposé**



# SÉQUENCE PRINCIPALE ET CLASSIFICATION DES ÉTOILES



# CLASSIFICATION DES ÉTOILES



Dans le ciel, il y a

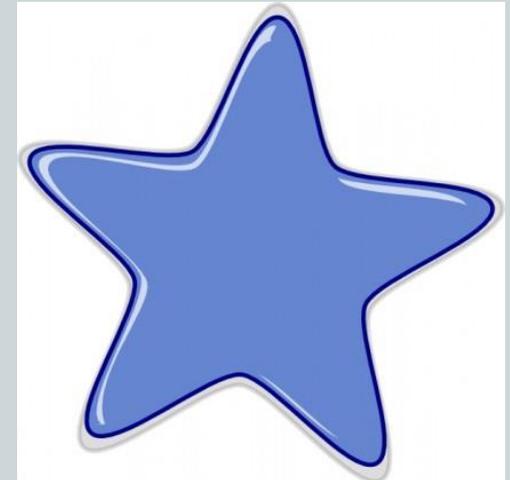
- Des étoiles plus ou moins brillantes, si on tient compte de la distance, on parlera de magnitude absolue
- Des étoiles de couleur différentes : bleue, jaune, rouge , on parlera alors d'indice de couleur (liée à la température effective)



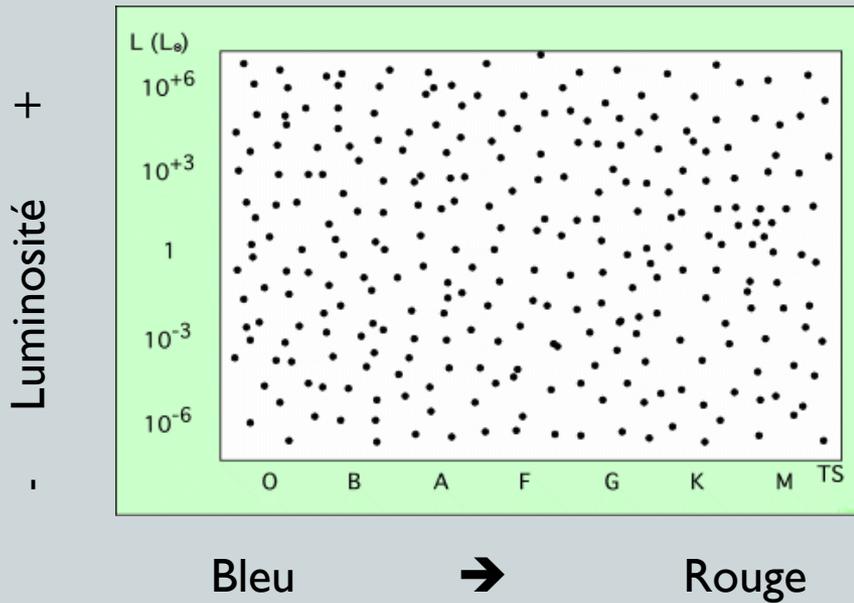
# CLASSIFICATION DES ÉTOILES



- Y a-t-il un lien entre la magnitude absolue des étoiles et leur indice de couleur ?



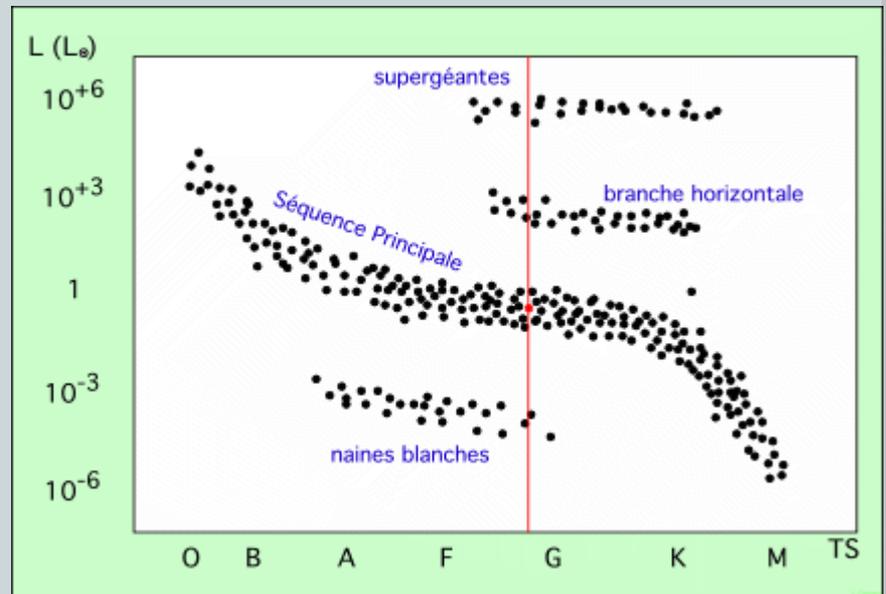
# CLASSIFICATION DES ÉTOILES



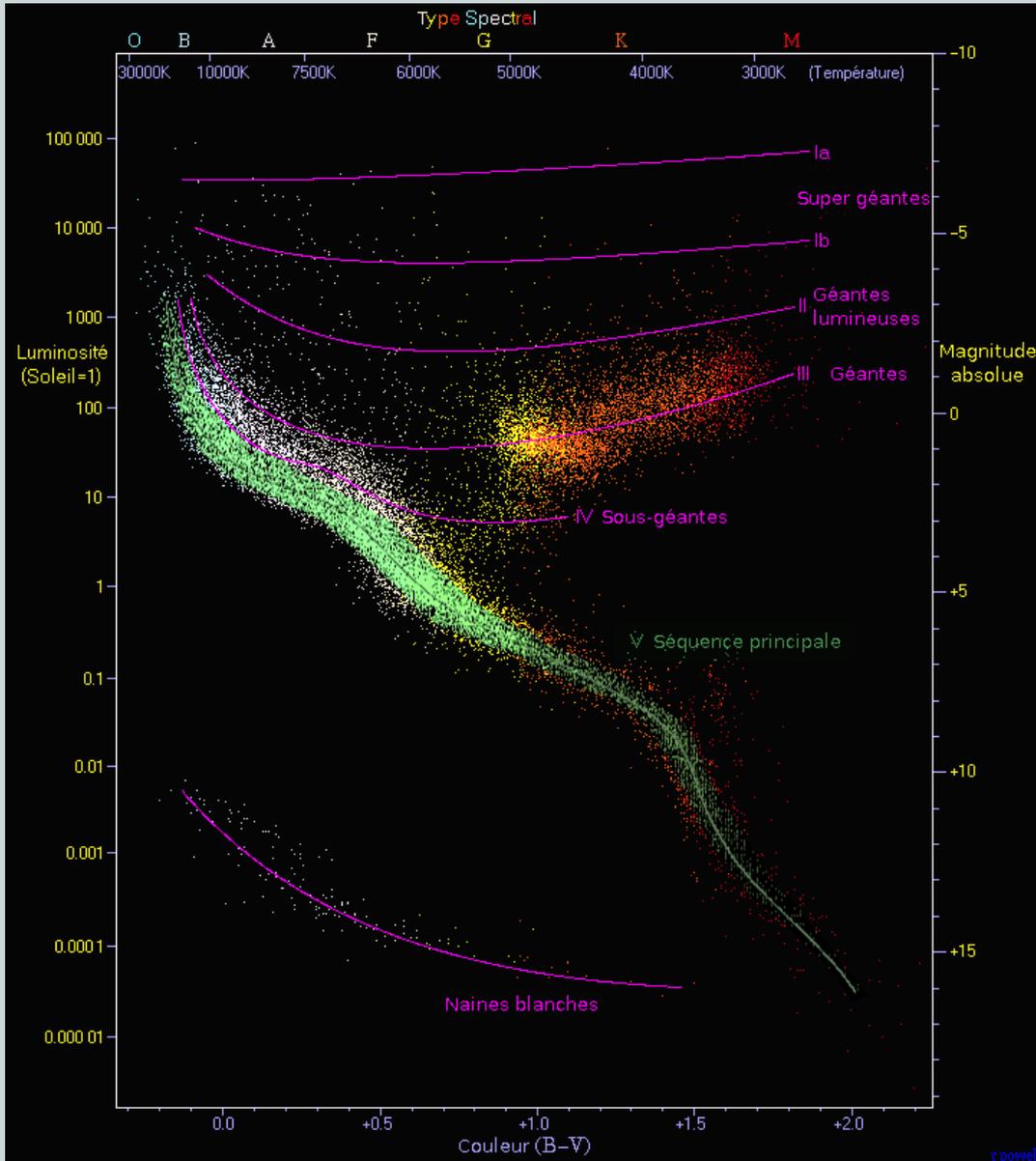
Cas d'une distribution quelconque (non corrélée)

Et oui, il y a une corrélation !

Le diagramme réel simplifié indice de couleur/magnitude absolue



# DIAGRAMME HR (DE HERTZSPRUNG - RUSSELL)



**En ordonnée** : la luminosité, le plus brillant étant en haut;

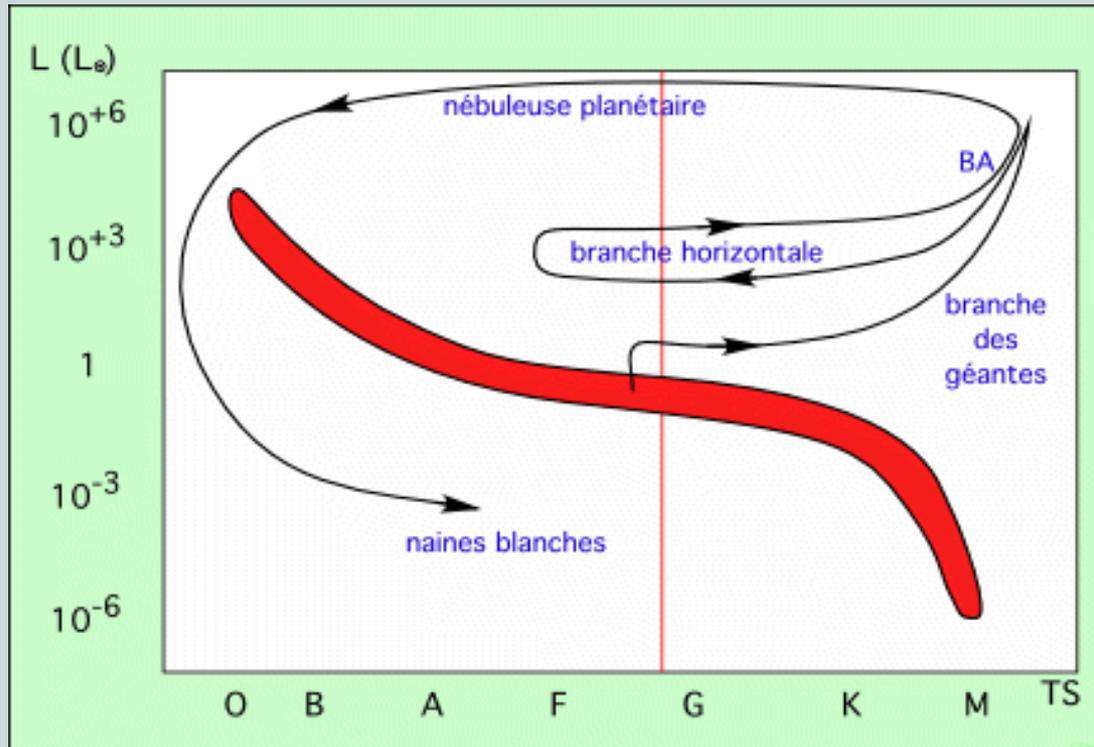
**En abscisse** : la température effective, ou l'indice de couleur, le plus chaud étant à gauche (couleur bleue)

Ce diagramme représente 22 000 étoiles du catalogue du satellite Hipparcos, ainsi que 1 000 étoiles de faible luminosité (naines rouges ou blanches) extraites du catalogue Gliese des étoiles proches



# DIAGRAMME H-R

Au cours de sa vie, une étoile est située sur la « séquence principale » du diagramme HR, puis à la fin de sa vie, elle quitte la séquence principale...



Exemple évolution d'une étoile de 1,2 masse solaire



- Illustration avec des étoiles connues ...

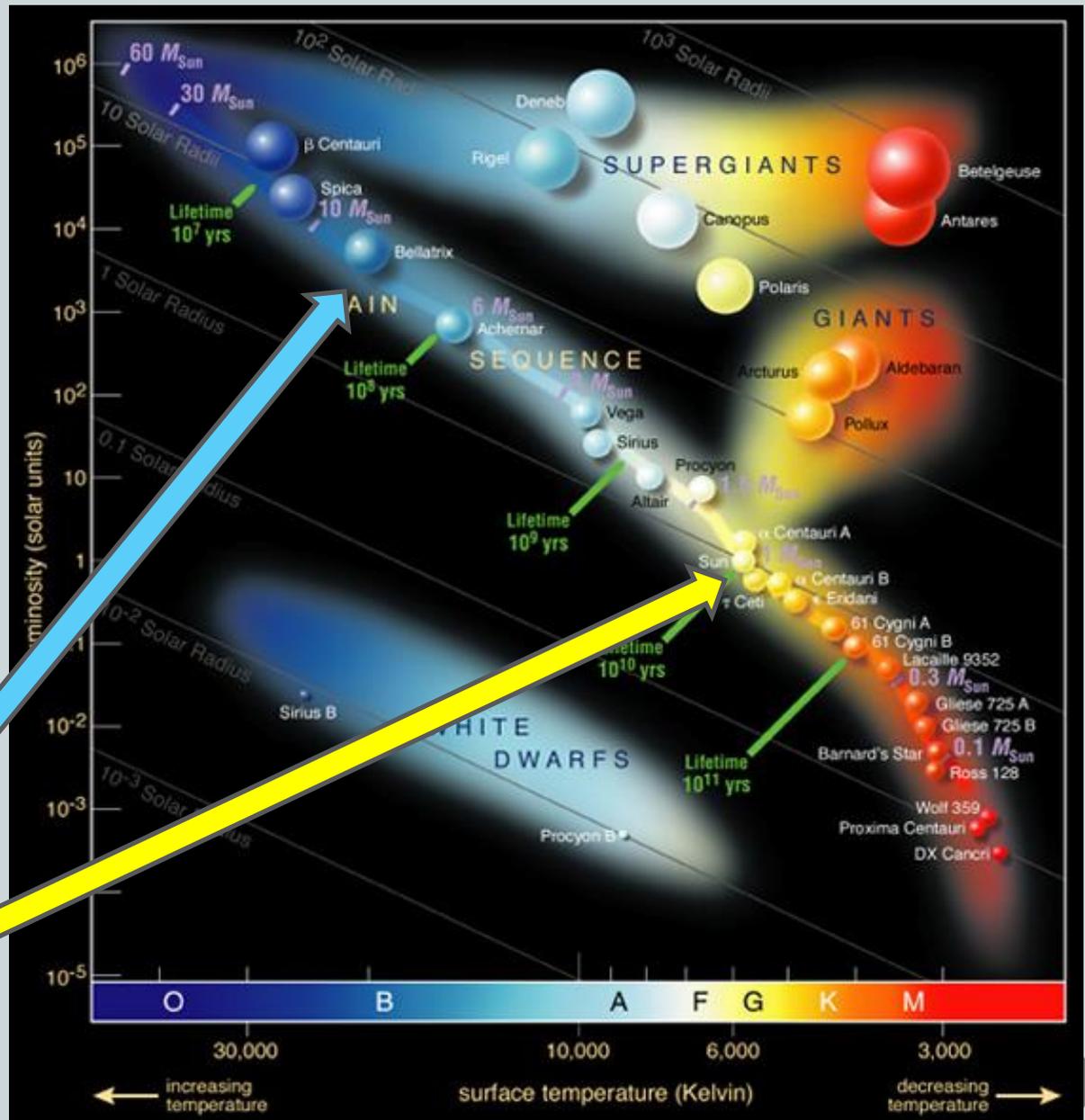


# DIAGRAMME H-R

*Nota : les couleurs sont exagérées pour la compréhension*

Dans la séquence principale, on trouve des étoiles:

- A) Massives : géantes bleues
- B) Peu massives: naines rouges et jaunes (type solaire)



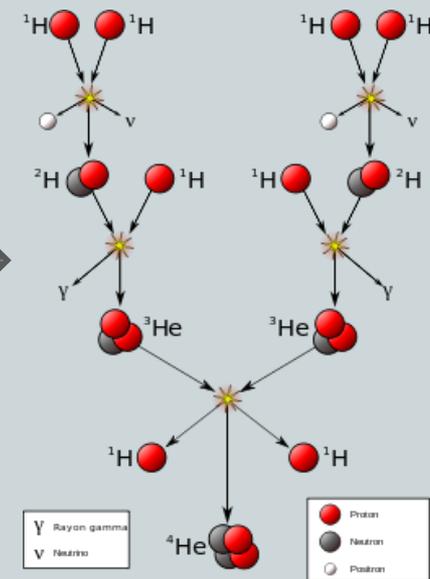
Les étoiles appartiennent à un type spectral (O,B,A,F,G,K,M,...) où leur température de surface (couleur), luminosité, masse sont analogues. Ex. type O : très chaudes (bleues), très lumineuses et massives. Le soleil est G2V

# LA SÉQUENCE PRINCIPALE

- Durant la phase de séquence principale, l'étoile est en équilibre hydrostatique, par 2 forces qui s'opposent et la maintiennent en équilibre :
  - 1) Les réactions thermonucléaires (\*) qui ont lieu au cœur de l'étoile et tendent à la faire augmenter de volume
  - 2) Les forces de gravité, qui ont tendance à la faire se contracter .
- La masse de l'étoile est l'élément déterminant de son évolution. Plus une étoile est massive, plus elle consomme rapidement son hydrogène car la température y est plus élevée du fait de la compression induite par la gravité plus forte

(\*) lorsque le cœur de l'étoile :

- Atteint env. 7 à 8 millions de degrés, c'est la fusion de l'hydrogène plasma en hélium (chaîne proton-proton)
- dépasse 18 millions de degrés, une autre chaîne de réaction prédomine : le cycle carbone-azote-oxygène (chaîne CNO)



*Nous allons voir que :*

**L'évolution finale d'une étoile est variable suivant sa classification**



# EVOLUTION DES ÉTOILES DE LA SÉQUENCE PRINCIPALE : LES DIFFÉRENTS CAS

Tableau simplifié

Type d'astres de la séquence principale	Evolution stellaire finale
<b>Etoiles bleues</b> (*)	Supergéante rouge - Supernova - Étoile à neutron ou trou noir
<b>Etoiles blanches</b> <b>Etoiles jaunes type solaire</b>	Géante rouge - Nébuleuse planétaire - Naine blanche
<b>Naines rouges</b>	Naine blanche
<b>Naines brunes</b>	Naine brune

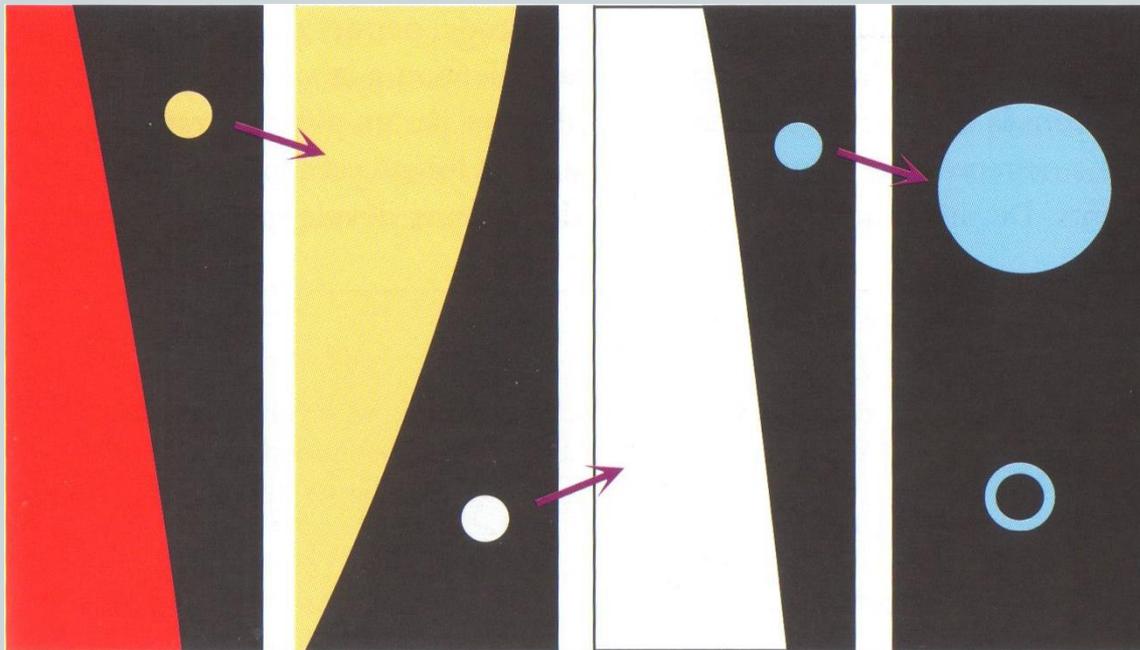
NB : (\*) Le cas des étoiles de type Wolf-Rayet, ayant comme progéniteur les étoiles bleues massives O, n'est pas abordé ici



# COMPARAISON DE LA TAILLE DES ÉTOILES : DES GÉANTES ROUGES AUX ÉTOILES À NEUTRONS



## TAILLE COMPARÉE DES ÉTOILES



a

b

c

d

### **Taille comparée des étoiles.**

Les étoiles sont supposées avoir la même masse que le Soleil. De gauche à droite:

- (a) La réduction de diamètre entre une géante rouge et le Soleil est de 250,
- (b) celle entre le Soleil et une naine blanche est de 100,
- (c) celle entre une naine blanche et une étoile à neutrons est de 500,
- (d) celle entre une étoile à neutrons et un trou noir est de 5.



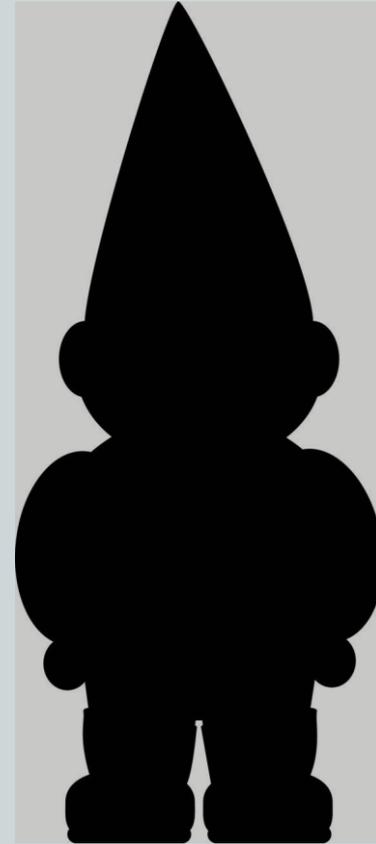
The left side of the slide features a series of vertical stripes in various shades of gray, ranging from dark to light. Overlaid on these stripes are several circles of different sizes, also in shades of gray, arranged in a roughly vertical line. The largest circle is at the top, with smaller ones below it, creating a sense of depth and movement.

# EVOLUTION FINALE DES ÉTOILES

# Commençons par les Naines Brunes

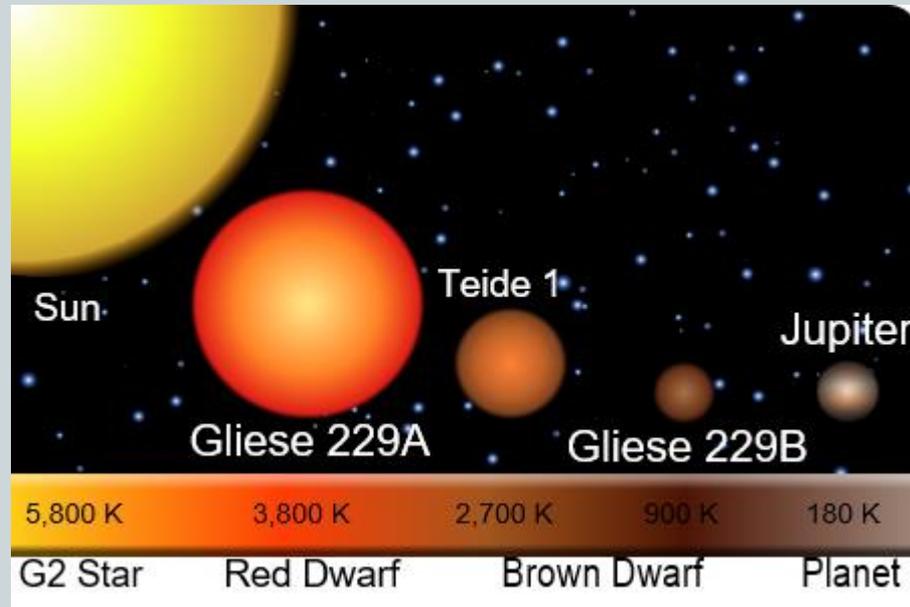


Image d'artiste



# NAINES BRUNES

C'est un objet substellaire, une étoile « ratée ». La masse accumulée inférieure à 0,07 masse solaire ne permet pas la fusion thermonucléaire de l'hydrogène. C'est un objet insuffisamment massif pour être considérée comme une étoile mais plus massif qu'une planète géante (> 13x Jupiter). L'étoile commence à se refroidir dès sa formation et à s'éteindre en **naine brune**



*Exemple de naine brune : Teide 1 est la 1<sup>ère</sup> naine brune observée (janvier 1994). Située à 400 al dans l'amas des pléiades. Désignée ainsi car découverte par un observatoire sur l'île de Ténérife. Agée de 120 millions d'années seulement, température de surface 2 600°K*

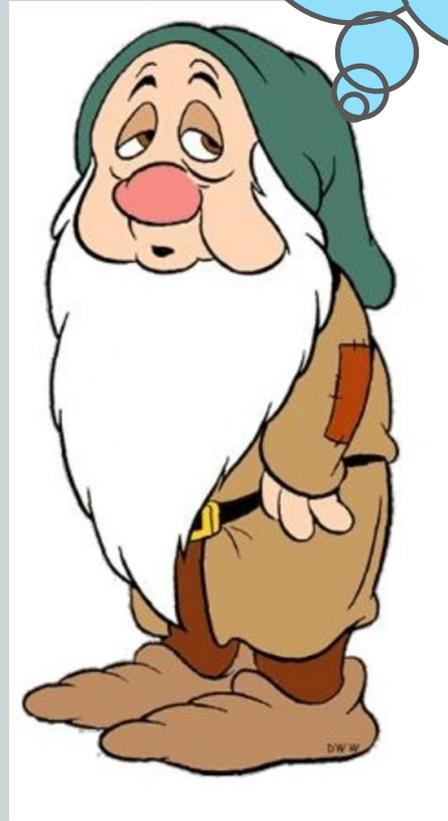
# NAINES BRUNES

- Quand les naines brunes atteignent plusieurs milliards d'années, elles ont des températures de surface allant de 400 à 1 000K, les rendant peu différentes à ce niveau de certaines planètes géantes gazeuses.



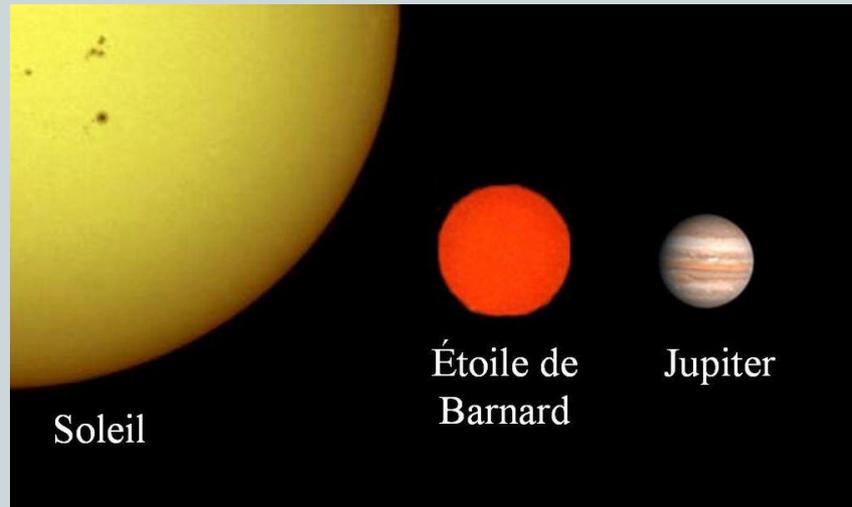
# PASSONS AUX NAINES **ROUGES**

Ah!  
Ça m'intéresse !



# NAINES ROUGES

- Une **étoile rouge** de la séquence principale, appelée communément **naine rouge**, est une étoile de type spectral MV (lire « M cinq »), classe de luminosité V, de type spectral M rouge .
- Ces étoiles sont peu massives et de température peu élevée. Ayant une masse comprise entre 0,075 et 0,4 masse solaire ( $M_{\odot}$ ) et une température inférieure à 4 000 K en surface, ce sont des étoiles peu lumineuses
- Les naines rouges seraient de loin les étoiles les plus nombreuses de l'Univers



Taille comparée d'une naine rouge : l'étoile de Barnard, constellation Serpenteaire

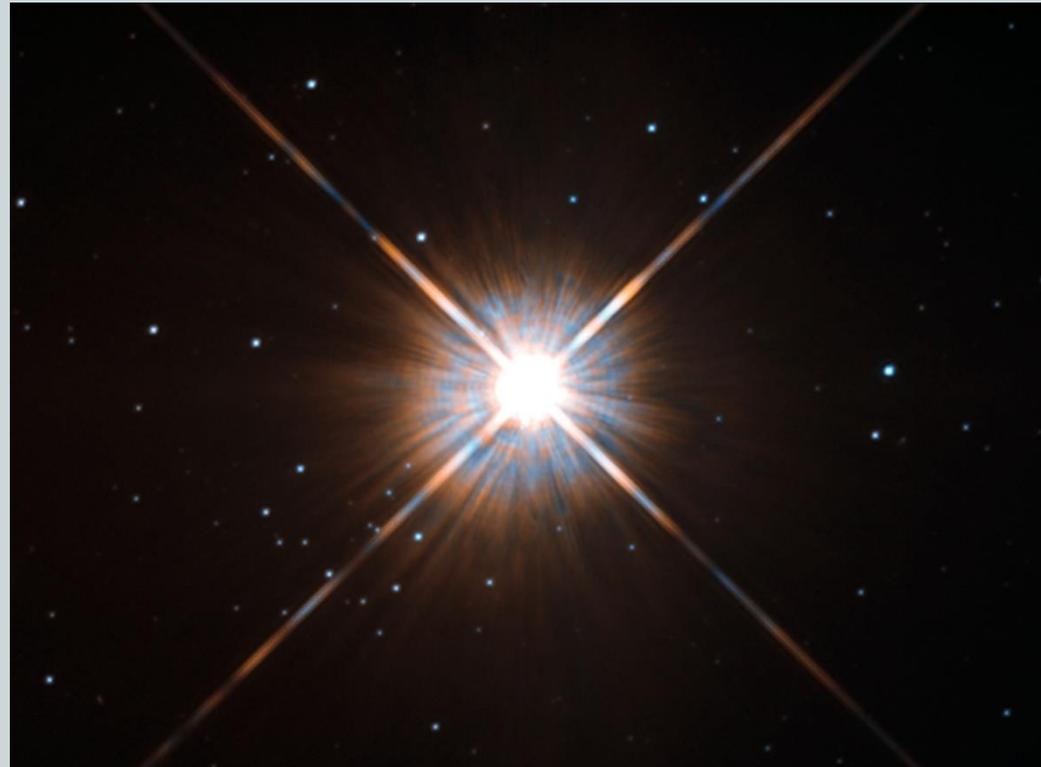


# NAIN ROUGE : *UN EXEMPLE PROXIMA DU CENTAURE*

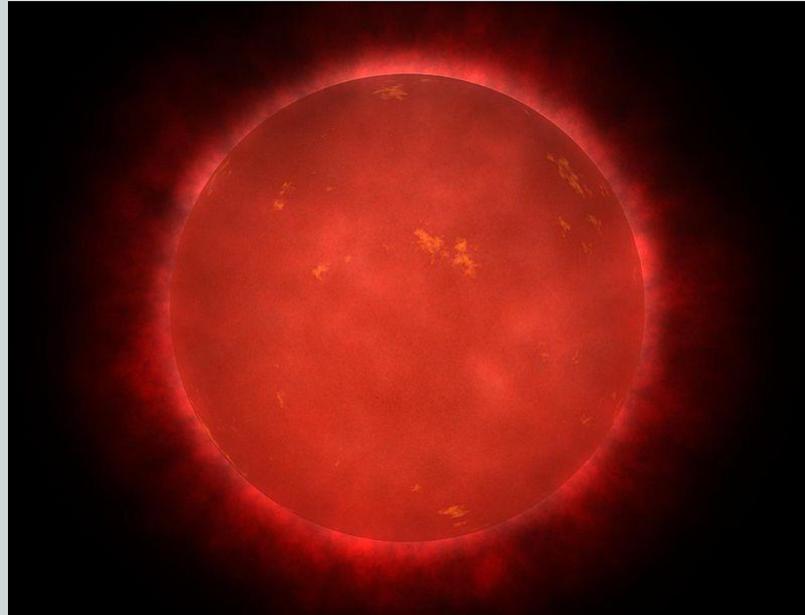
- Proxima du Centaure est l'étoile la plus proche du soleil à 4,2 al. C'est une naine rouge de magnitude apparente 11, dont le rayon est env. 1,5 fois celui de Jupiter et la masse 1/8 de celle du Soleil.

Les premières naines rouges ont été découvertes au XX<sup>ème</sup> siècle. En 1915 pour Proxima du Centaure et en 1916 pour l'étoile de Barnard. Ces étoiles ne sont pas visibles à l'œil nu car peu lumineuses.

La constellation du Centaure est visible dans l'hémisphère sud



# VIE DES NAINES ROUGES



- En raison de leur faible masse, leur température centrale n'est pas très élevée. La conversion de l'hydrogène en hélium s'y effectue à un rythme très lent. Par conséquent, leurs réserves en hydrogène s'épuisent lentement. Ces étoiles possèdent donc une durée de vie plus longue que les autres types d'étoiles.



# FIN DE VIE DES NAINES ROUGES

- À cause de leur faible température (du fait également de leur petite masse), les naines rouges ne franchissent pas le stade où les autres étoiles commencent la fusion de l'hélium. Elles ne deviennent donc jamais des géantes rouges. Elles se contractent et s'échauffent lentement jusqu'à ce que tout leur hydrogène soit consommé. C'est pourquoi de tous les types d'étoiles, les naines rouges sont celles qui ont la plus longue vie

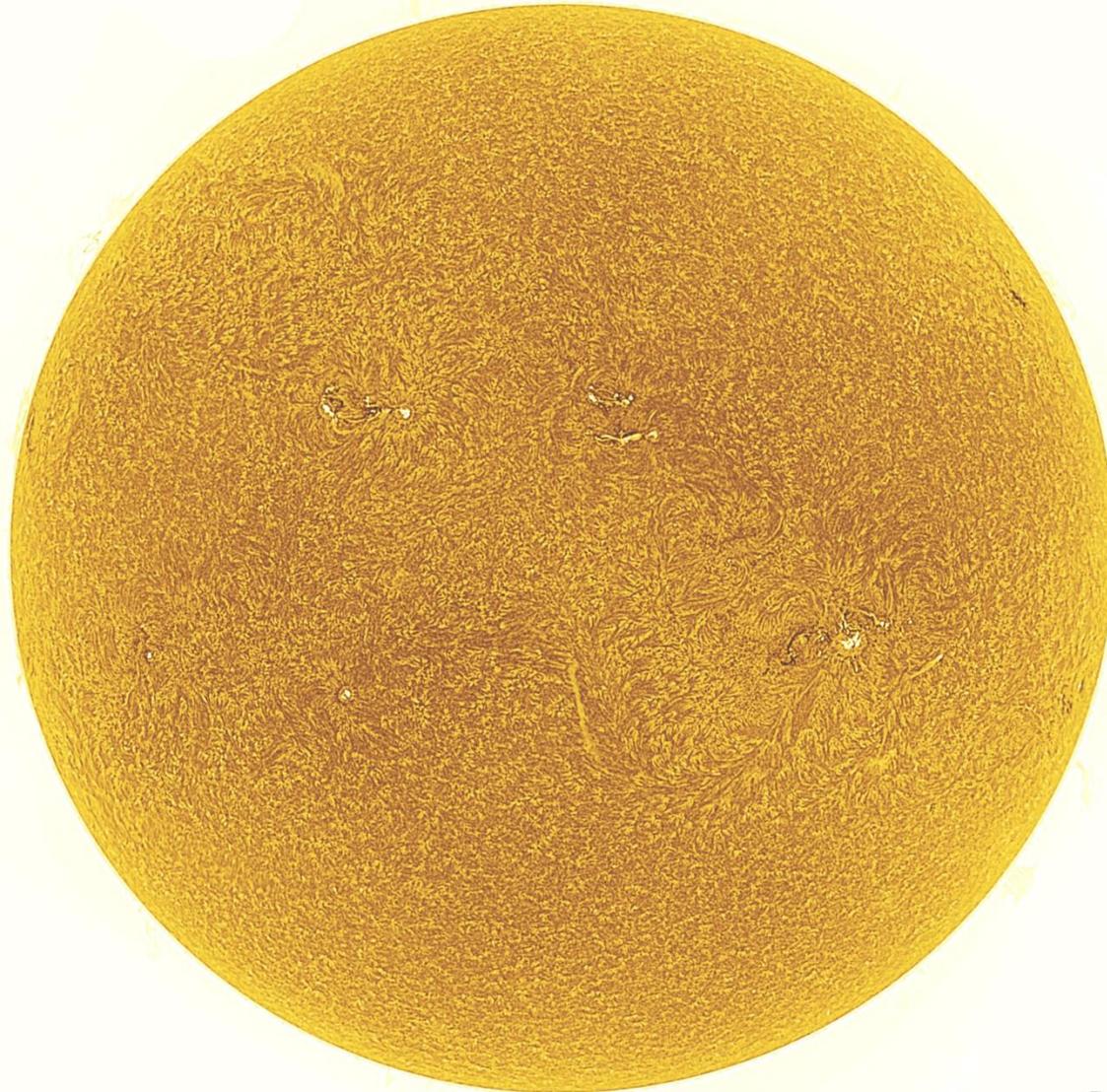


Un jour, je  
les aurai !



# ET LE SOLEIL ?

Sun 12/02/2024



AL



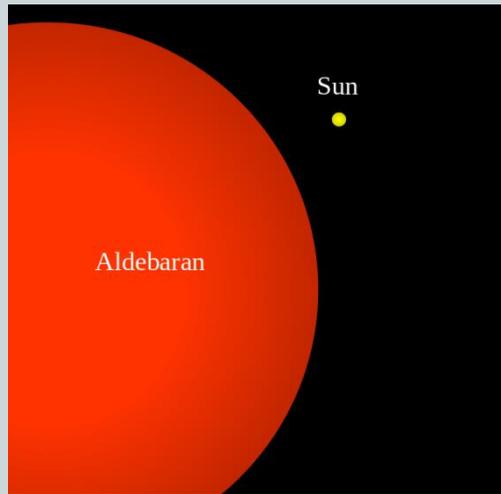
## ETOILE TYPE SOLAIRE => 1<sup>ÈRE</sup> ÉTAPE : ÉVOLUTION EN GÉANTE ROUGE

- Après une longue phase sur la séquence principale, la concentration en protons est trop faible pour entretenir les réactions nucléaires, la fusion de l'hydrogène s'arrête au centre, la pression interne chute, la gravité provoque alors la contraction du cœur
- De nouvelles réactions ont lieu dans le noyau, qui conduisent à la combustion de l'hélium en carbone ( réaction *triple alpha* ). Le carbone se combine à son tour avec l'hélium pour donner de l'oxygène, un nouvel équilibre hydrostatique se met en place.
- Les couches externes de l'étoile se dilatent ce qui a pour conséquence de diminuer la température de la chromosphère de 5 500 K à 3 700 K.
- L'étoile gonfle et prend une teinte rouge. D'où la phase de **géante rouge**.,



## EX. ÉTOILE GÉANTE ROUGE : ALDÉBARAN

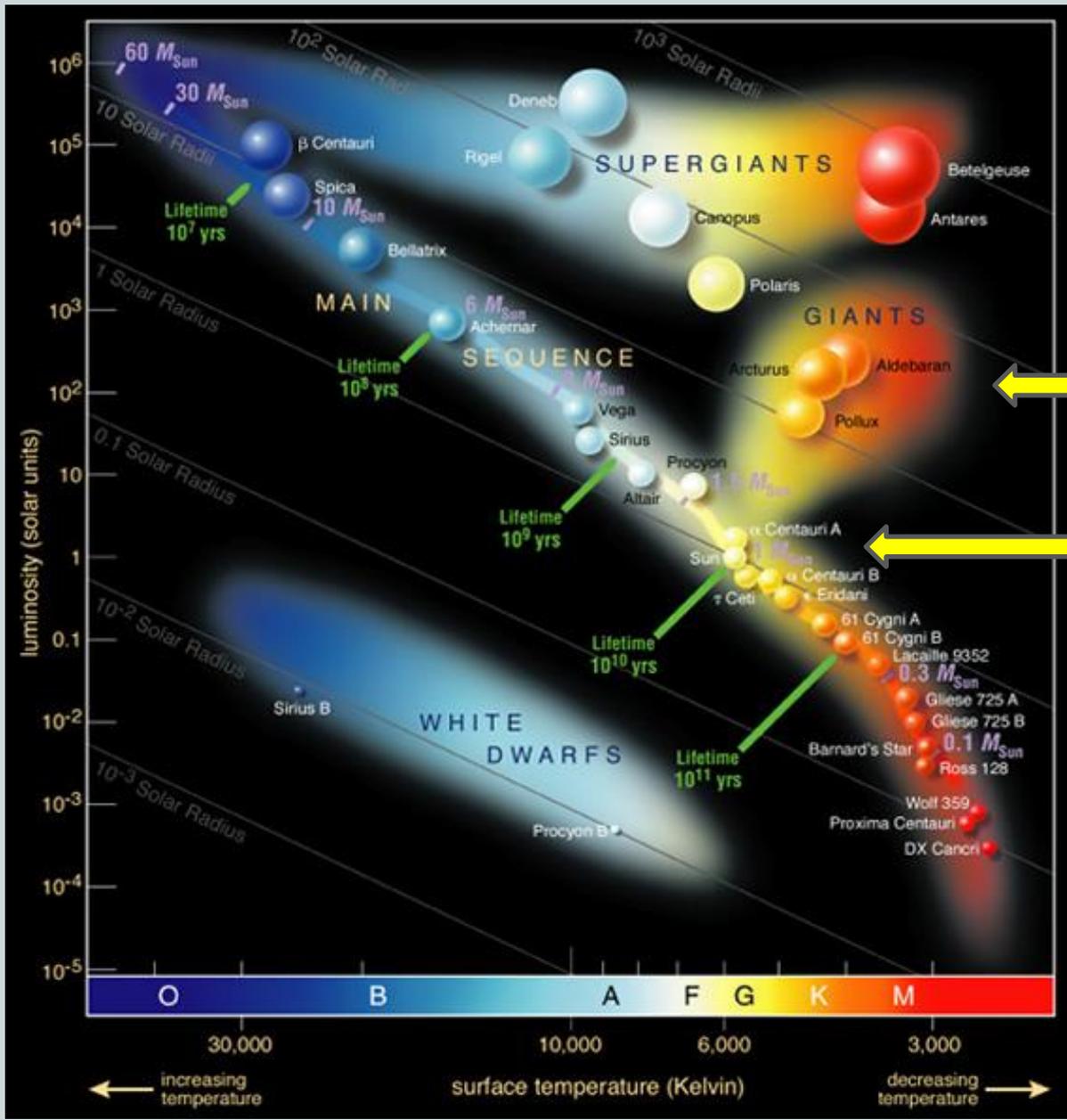
- Aldébaran (Alpha Tauri), l'étoile la plus brillante de la constellation du Taureau, est en fait une étoile orangée (\*) qui a quitté la séquence principale après avoir brûlé tout son hydrogène. Maintenant, elle brûle essentiellement de l'hélium.



- Le rayon d'Aldébaran est env. 45 x celui du Soleil
- L'avenir du Soleil : c'est actuellement une étoile en milieu de vie qui deviendra une géante rouge d'ici 5,4 milliards d'année. Son rayon sera alors plus de 200x celui actuel

(\*) classe de luminosité III, classe spectrale K5





Aldébaran

Soleil



# EVOLUTION ÉTOILE TYPE SOLAIRE => 1<sup>ÈRE</sup> ÉTAPE GÉANTE ROUGE => 2<sup>ÈME</sup> ÉTAPE **NAINE BLANCHE + NÉBULEUSE PLANÉTAIRE**

- Moins d'Hélium dans le cœur d'une étoile de masse solaire , moins de réactions possibles : =>
  - son noyau C-O se contracte
  - Combustion He et H dans les couches au-dessus du cœur
  - tandis que les couches périphériques(10% de la masse) sont expulsées sous forme d'une coquille de gaz en expansion appelée **nébuleuse planétaire** (NP).
- Nébuleuse planétaire :
  - Phase rapide ( quelques dizaines de milliers d'ans)
  - Colorée, c'est le rayonnement ultraviolet du vent stellaire émis par le noyau résiduel qui est responsable de la luminosité de la nébuleuse planétaire par le phénomène de photo ionisation
- **Le noyau résiduel** : c'est un corps compact qu'on appelle **naine blanche**. Il est composé des reliquats de fusion et ne peut plus maintenir de réactions nucléaires, son rayonnement est lié à son refroidissement ( suivant une loi de corps noir).



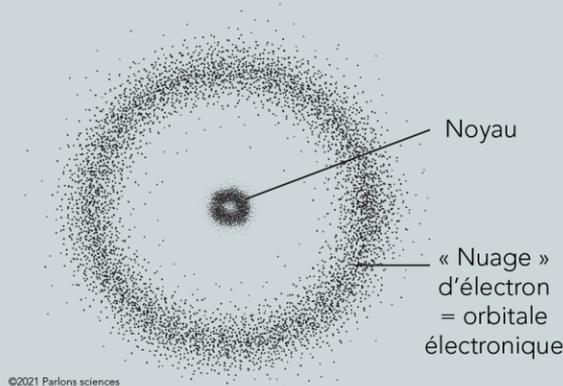
# NAINE BLANCHE

- Une **naine blanche** est un objet céleste de forte densité car il n'y a plus de réactions thermonucléaires pour contrecarrer la gravité. (masse volumique env. 1 tonne / cm<sup>3</sup>, soit 1 million de fois celle de l'eau). Seules les étoiles à neutron et les trous noirs sont plus compacts que les naines blanches. Typiquement, elle a une masse voisine de celle du soleil (\*) pour un rayon 100x plus petit !
- Le cœur des naines blanches est composé typiquement de carbone et d'oxygène.
- L'atmosphère des naines blanches les plus communes (80%), dit de type spectral DA, est composé d'hydrogène.
- Luminosité faible (dû à leur petite surface) : environ un millième de la luminosité solaire
- C'est un objet stable qui va se refroidir lentement au cours du temps et deviendrait à très long terme une naine noire (*cependant compte tenu de l'âge de l'univers, il n'existerait pas de telles naines noires*)

(\*) Et dans tous les cas < 1,4 masse solaire selon la limite de Chandrasekhar



# LE VIDE DANS LES ATOMES & DENSITÉ DE LA MATIÈRE



- La matière ordinaire est constituée de vide : cas de l'hydrogène : le rayon du noyau (le *proton*) est 100 000 fois plus petit que celui de l'atome (*orbitale de l'électron*).
- Si le noyau est comparé à une bille, l'atome mesurerait 2 km de diamètre
- *C'est comparativement nettement plus que le rayon du soleil comparé à l'orbite de Pluton ( $R_o = 696\,300\text{ km}$ ,  $\frac{1}{2}$  grand axe 5,9 milliards de km, rapport env. 8500) . Le « vide » y est nettement plus important*

Dans le cas des **naines blanches** : le cœur de l'étoile, consiste en un plasma : c'est-à-dire une matière composée d'ions (des atomes où des électrons ont été arrachés) et d'un gaz d'électrons "dégénérés". En phase de contraction de l'étoile, les orbitales électroniques finissent par se juxtaposer avec celles des atomes voisins. La densité de la matière augmente fortement. Les électrons de ces orbitales exercent néanmoins une pression empêchant les atomes de se rapprocher plus. (*Pression de dégénérescence – Principe exclusion de Pauli – Gaz de Fermi*)

*On comprend mieux la densité colossale des naines blanches !*



## DES LABORATOIRES ÉTUDIENT CES PLASMAS DENSES ET CHAUDS

*Exemple en Aquitaine : le  
laser Mégajoule associé  
au faisceau laser PETAL*

**... pour explorer différents axes de recherche**

### L'astrophysique

Les mesures des propriétés optiques des plasmas denses et chauds permettent d'acquérir des données sur le transport de l'énergie dans les étoiles pour aider les astrophysiciens à comprendre des phénomènes tels que l'explosion de supernovae.



### La planétologie

Les faisceaux laser du LMJ peuvent exercer des pressions comparables à celles qui règnent à l'intérieur des planètes offrant ainsi la possibilité aux planétologues de les étudier dans ces conditions extrêmes.



**Amener la matière dans des conditions extrêmes...**

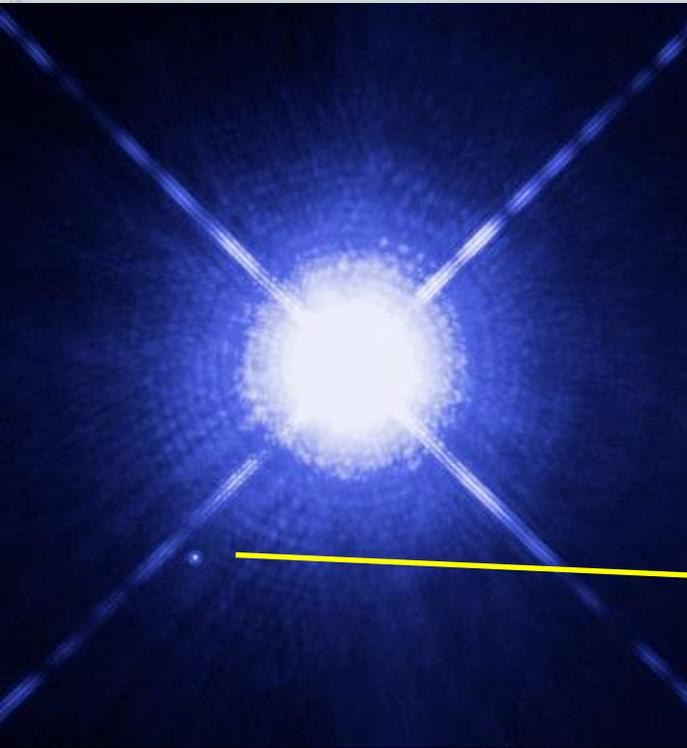


Le laser Mégajoule, avec ses 176 faisceaux, combiné au faisceau laser PETAL, offre l'opportunité d'étudier la matière à l'état de «plasma dense et chaud» dans des conditions extrêmes de température et de pression pouvant atteindre plus de 100 millions de degrés et un milliard de fois la pression atmosphérique. Dans l'univers, ce type de conditions se retrouve dans les étoiles comme notre soleil où se développent des réactions de fusion nucléaire qui produisent les rayonnements qui nous éclairent et nous réchauffent.

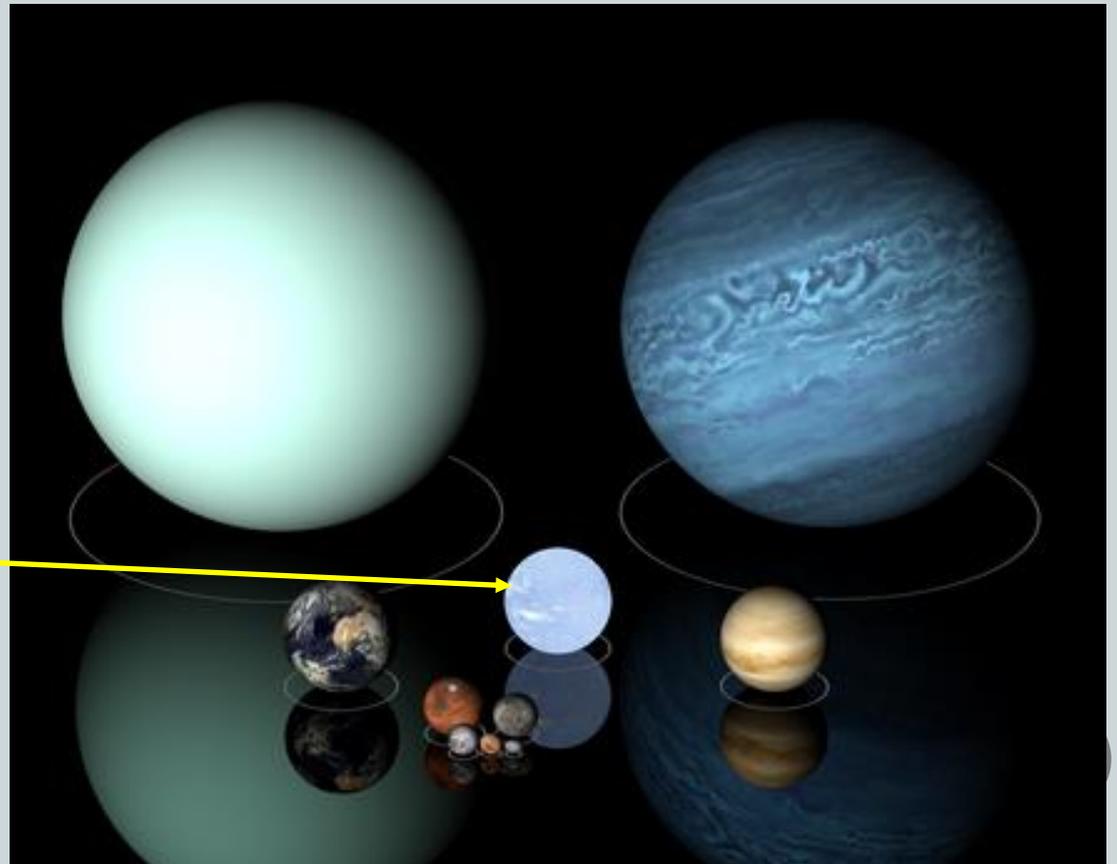


# NAINE BLANCHE : DIMENSION

- **Comparaison taille** : les rayons des naines blanches observées sont comparables en ordre de grandeur à celui de la Terre .
- Illustration ci-dessous avec Sirius B



Sirius B est le petit point en bas à gauche de Sirius A



# LES NÉBULEUSES PLANÉTAIRES

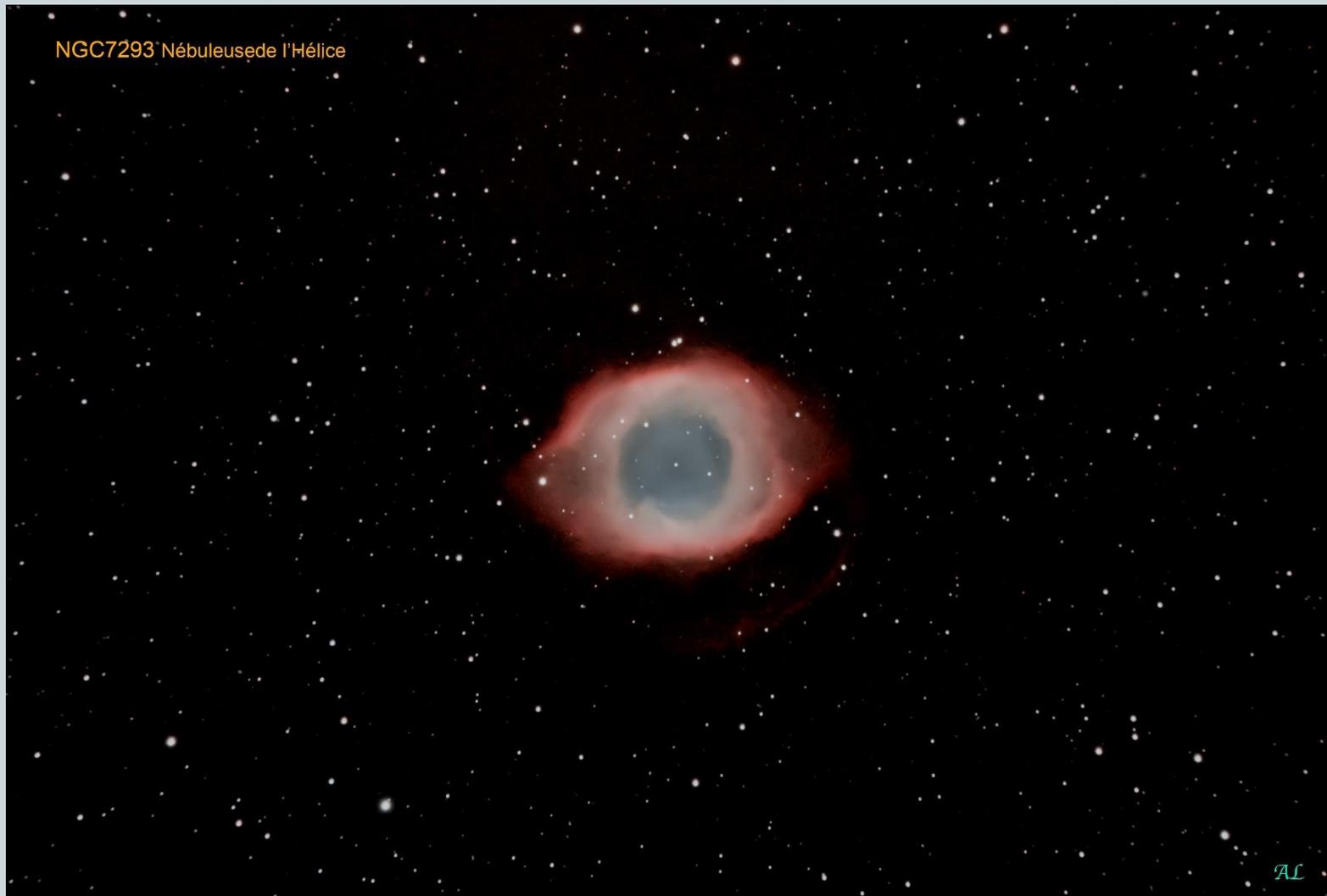
- Ces nébuleuses, improprement appelées planétaires pour des raisons historiques (W Herschel), sont des nébuleuses en émission constituées d'une coquille de gaz en expansion éjecté d'une étoile type solaire en fin de vie .Vitesse des gaz : 20 à 30 km/s
- Ce nuage est ionisé et donc coloré par les photons ultraviolets émis par l'étoile au centre évoluant en naine blanche .



NGC 7293 nébuleuse de l'Hélice,  
constellation du Verseau  
Image combinée Télescope Hubble et  
observatoire Kitt Peak



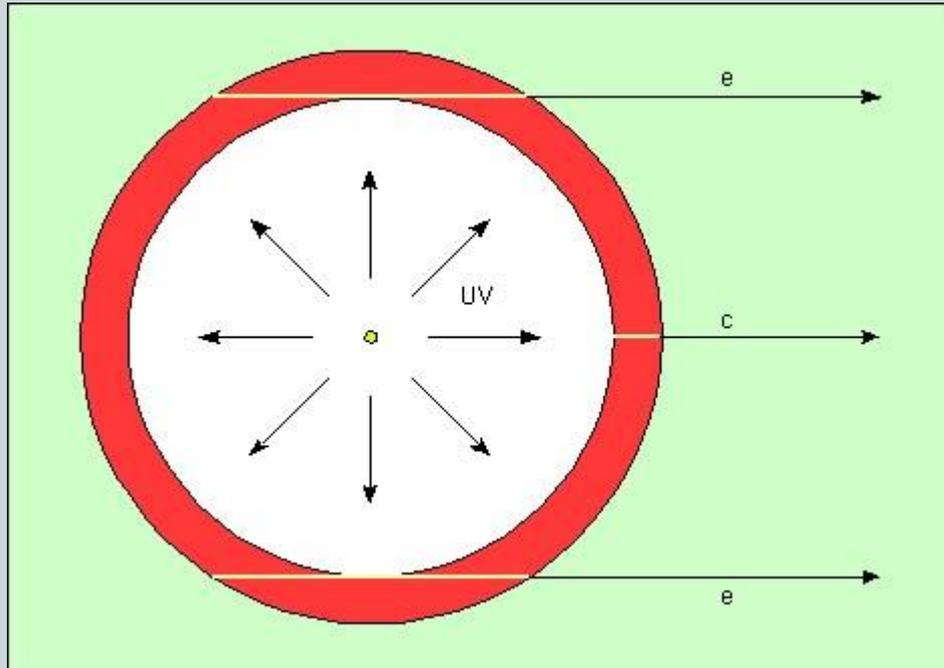
NGC7293 Nébuleuse de l'Hélice



AL



# NÉBULEUSE PLANÉTAIRE / FORME



- La nébuleuse planétaire est une coquille de gaz. Mais vue de la Terre, elle nous apparaît comme un anneau. Explication : dans la partie extérieure de la coquille (pour notre regard, en haut et en bas du schéma), la lumière qui nous parvient provient d'une grande épaisseur de matière. Cependant, la lumière visible au centre de la coquille, provient d'une épaisseur beaucoup plus faible. Il y a beaucoup moins de matière émissive, et donc elle est donc beaucoup moins visible..



# AUTRE EXEMPLE DE NÉBULEUSE PLANÉTAIRE / M 27

M27



AL

# M27 – LA NÉBULEUSE DE L'HALTÈRE - IMAGE HUBBLE



# NÉBULEUSE PLANÉTAIRE M 27

- **Désignation :**
  - M 27 'Nébuleuse de l'Haltère' (Dumbell en anglais)
- **Observation :**
  - Constellation du Petit Renard, au milieu du Triangle d'été
  - Magnitude apparente : 7,4
  - Dimensions apparentes : 8 x 5,7 min d'arc
- **Découverte :**
  - par Charles Messier le 12 juillet 1764. c'est la 1<sup>ère</sup> nébuleuse planétaire observée de l'histoire de l'astronomie. (classée comme objet diffus à l'époque)
  - Le terme 'planétaire' est proposé par W. Herschell en 1785 en raison de sa ressemblance visuelle avec la planète Uranus qu'il venait de découvrir.



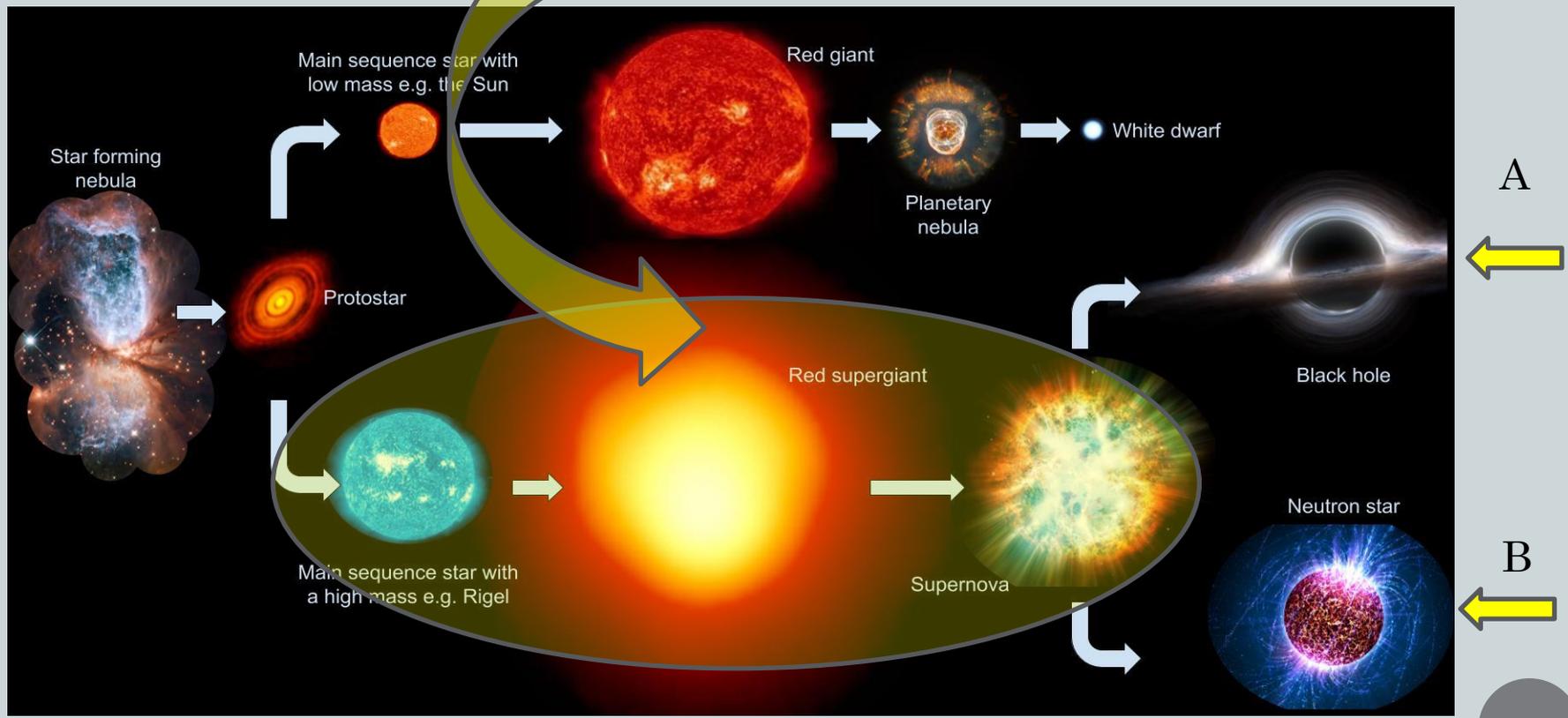
# IMAGE ARTISTIQUE FIN DE VIE DU SOLEIL



The left side of the slide features a series of vertical stripes in various shades of gray, ranging from dark to light. Overlaid on these stripes are several circles of different sizes, also in shades of gray, arranged in a somewhat vertical sequence. The largest circle is at the top left, with smaller circles below it, some overlapping the stripes.

# **FIN DE VIE DES ÉTOILES MASSIVES BLEUES**

# EVOLUTION FINALE STELLAIRE DES ÉTOILES MASSIVES



Pour (A) et (B) voir exposés AL « Les trous noirs » et « Etoiles à neutrons »

## LES ÉTOILES MASSIVES : LES GÉANTES BLEUES

### EVOLUTION : ÉTOILE BLEUE MASSIVE => SUPER GÉANTE ROUGE => SUPERNOVA À EFFONDREMENT GRAVITATIONNEL

- Les étoiles  $> 8$  masses solaires (les **géantes bleues**), du fait des conditions de pression et de température dans leur cœur sortent de la séquence principale en qq centaines de millions d'années pour devenir des **super géantes rouges** car la fusion de l'hydrogène y est accélérée par un phénomène de catalyse du carbone (cycle CNO).
- Dans le cœur des **super géantes rouges** (dont la température est plus élevée que dans les géantes rouges), des réactions de fusion et de fabrication d'éléments plus lourds se mettent en place. Lorsque l'étoile arrive au stade ultime de la formation du fer (élément le plus stable), ces réactions s'arrêtent définitivement. Il n'y a plus assez de chaleur pour compenser la gravité. Le cœur de l'étoile se comprime et les noyaux des atomes de fer sont dissociés, les protons capturant les électrons pour former des neutrons. Ce nouveau cœur de neutrons formera une **étoile à neutrons**, tandis que les couches intermédiaires tombant sur ce centre compact produit une onde de choc qui souffle les couches extérieures formant le gaz rémanent de la supernova. C'est l'ensemble de ces phénomènes ultimes que l'on appelle : **supernova à effondrement gravitationnel (\*)**
- Dans les étoiles exceptionnellement massives, le cœur de l'étoile s'effondre directement en **trou noir**



(\*) Appelée aussi supernova à effondrement de cœur



*Dans la constellation ORION*

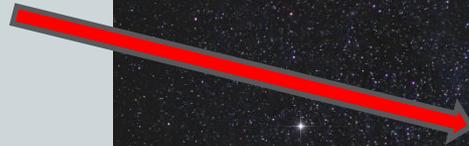
**EXEMPLE DE SUPER GÉANTE ROUGE :**

**BÉTELGEUSE**

LA 9<sup>IÈME</sup> ÉTOILE LA + BRILLANTE DU CIEL

DIMENSION : ENV. 1000 X SOLEIL

TEMPÉRATURE : 3600 K

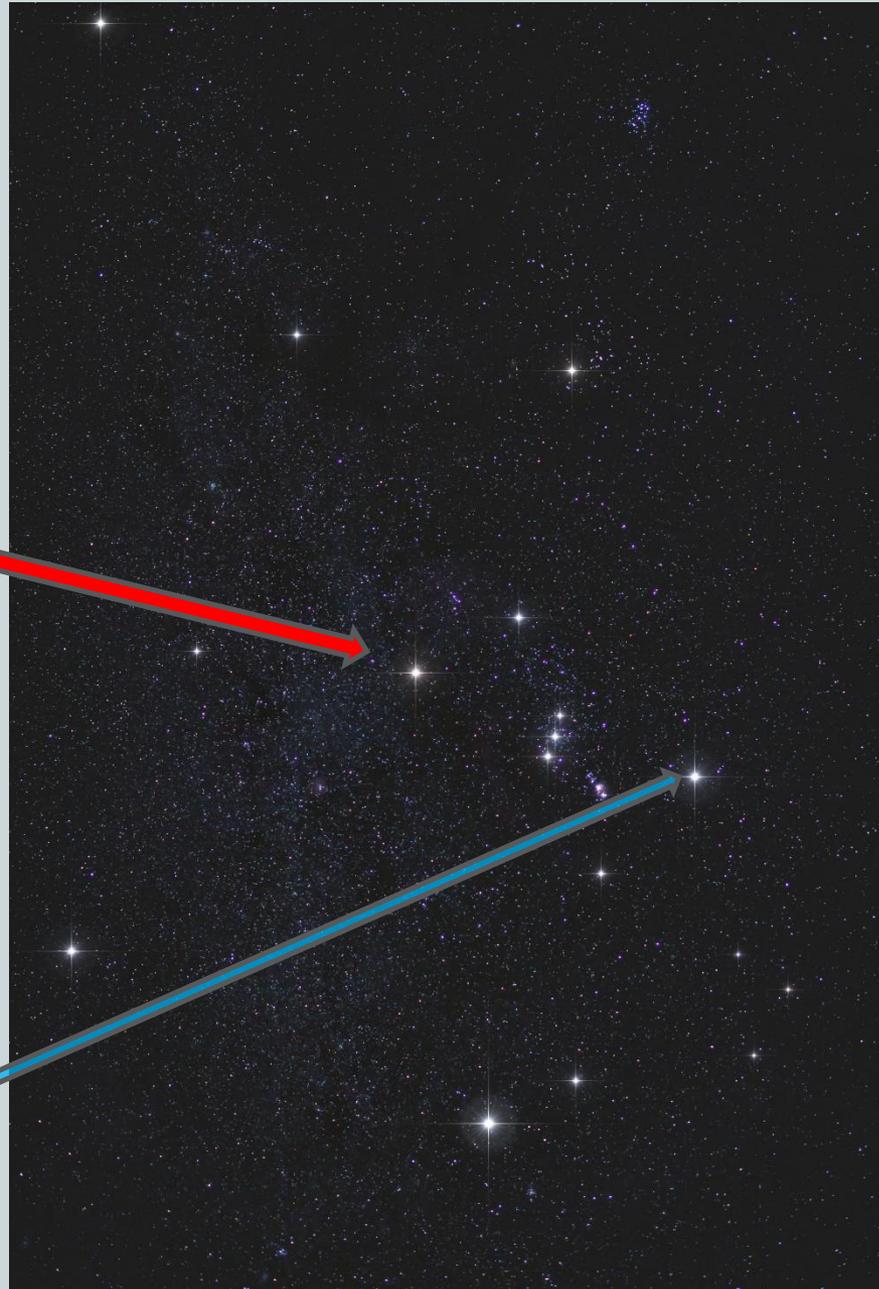
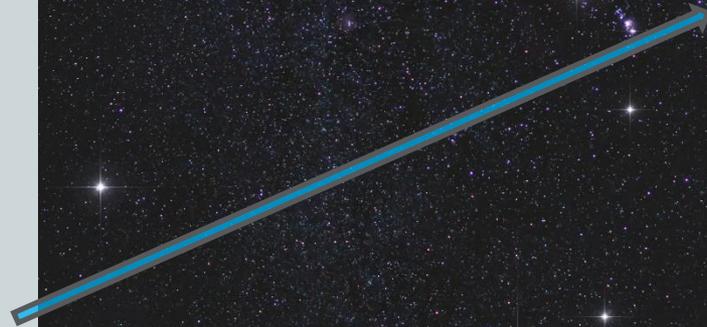


**EXEMPLE DE GÉANTE BLEUE : RIGEL**

LA 6<sup>IÈME</sup> ÉTOILE LA + BRILLANTE DU CIEL

DIMENSION : ENV. 60 X SOLEIL

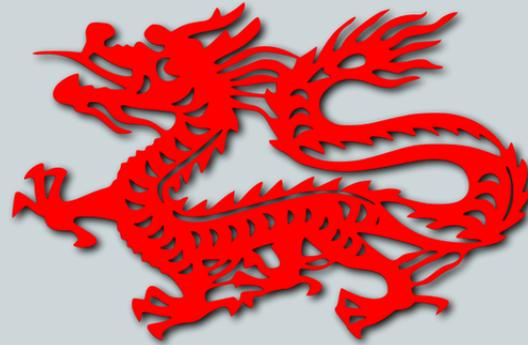
- TEMPÉRATURE : 10 000 K



# UNE SUPERNOVA HISTORIQUE SN 1054

DONT LE RÉMANENT EST APPELÉ ' LA NÉBULEUSE DU CRABE - M1 '

- La **nébuleuse du Crabe** , premier objet du catalogue Messier , situé dans la constellation du Taureau, est le reste de l'explosion d'une étoile massive en **supernova** observée par un astronome chinois de juillet 1054 à avril 1056



- Située à une distance d'env. 6 200 al de la Terre, la nébuleuse a un diamètre d'environ 10 al et sa vitesse d'expansion est de 1 500 km/s.
- C'est le premier objet astronomique à avoir été associé à une explosion historique de **supernova**
- Au centre se trouve une étoile à neutrons produite par cette supernova. Elle tourne sur elle-même 30x par seconde, son faisceau de radiation arrive à ce rythme sur terre tel un phare cosmique : c'est un pulsar.



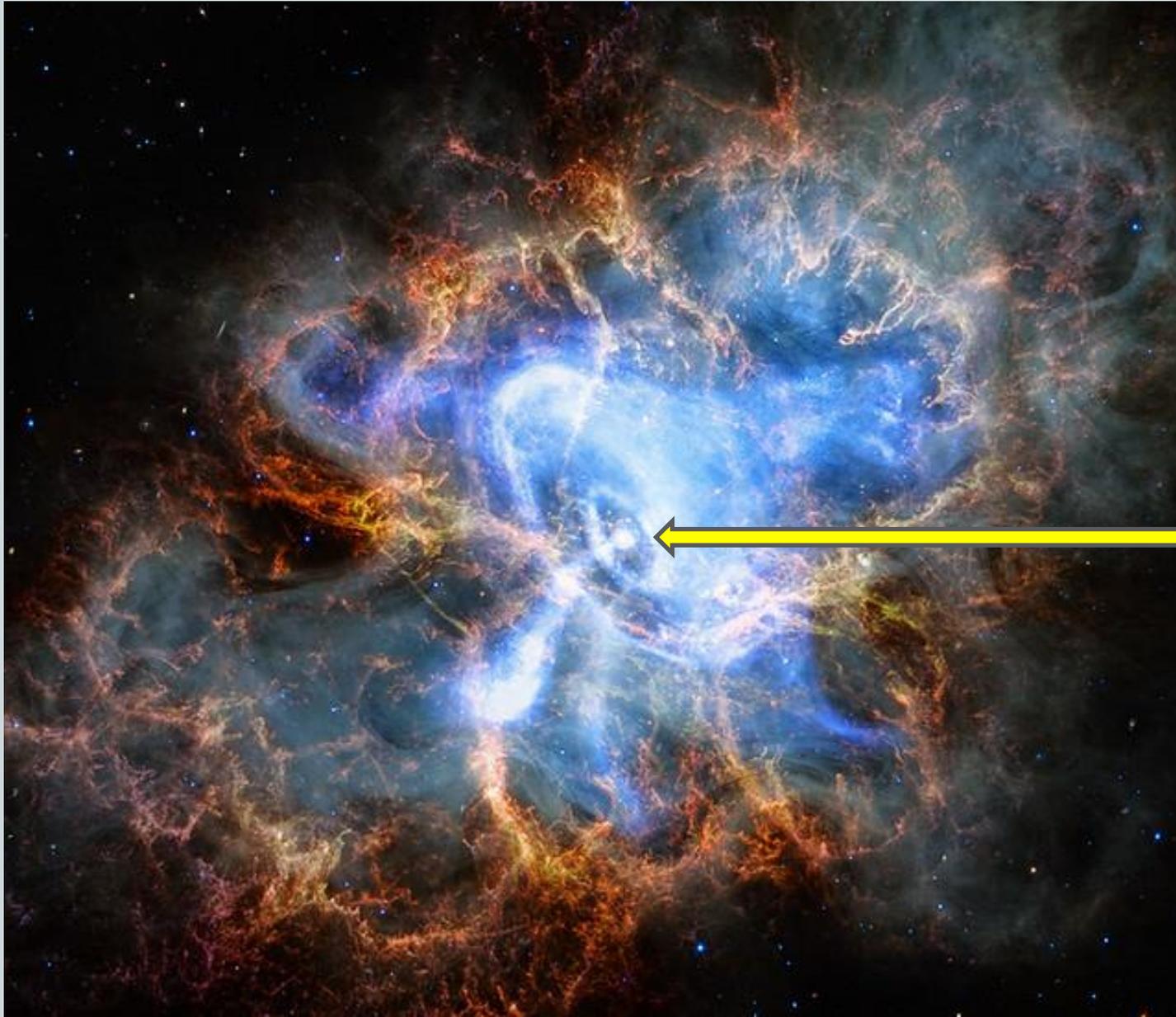
# PHOTO M1 – ASTRONOME AMATEUR

M1 - Nébuleuse du Crabe



α

# PHOTO 2024 DE **MI** PAR LE JWST



NASA : Image composite  
X-ray Chandra et  
infrarouge JWST

Étoile à  
neutron : pulsar



VIDÉO : [CHANDRA.SI.EDU/BLOG/NODE/880](http://CHANDRA.SI.EDU/BLOG/NODE/880)



## EXPLICATION DE LA VIDÉO (NASA)

- As the young pulsar slows down, large amounts of energy are injected into its surroundings. In particular, a high-speed wind of matter and anti-matter particles plows into the surrounding nebula, **creating a shock wave that forms the ring seen in the movie.** Jets from the poles of the pulsar spew X-ray emitting matter and antimatter particles in a direction perpendicular to the ring.
- **Over 22 years,** Chandra has taken many observations of the Crab Nebula. With this long runtime, astronomers see clear changes in both the ring and the jets in the new movie. Previous Chandra movies showed images taken from much shorter time periods — a 5-month period between 2000 and 2001 and over 7 months between 2010 and 2011 for another. The longer timeframe highlights mesmerizing fluctuations, including whip-like variations in the X-ray jet that are only seen in this much longer movie. A new set of Chandra observations will be conducted later this year to follow changes in the jet since the last Chandra data was obtained in early 2022.



# UNE AUTRE SUPERNOVA TRÈS ÉTUDIÉE : SN 1987A

- Un exemple récent d'explosion d'étoile en supernova suivi intensément dans d'excellentes conditions par de nombreux observatoires depuis sa découverte le 23 février 1987 : **SN 1987A**. L'étoile qui explosa était une supergéante bleue localisée à 168 000 al dans le grand nuage de Magellan (une galaxie satellite de La Voie Lactée)..
- Sa luminosité a atteint son maximum en mai 1987 avec une mag apparente de  $\approx +3$



# SN 1987A

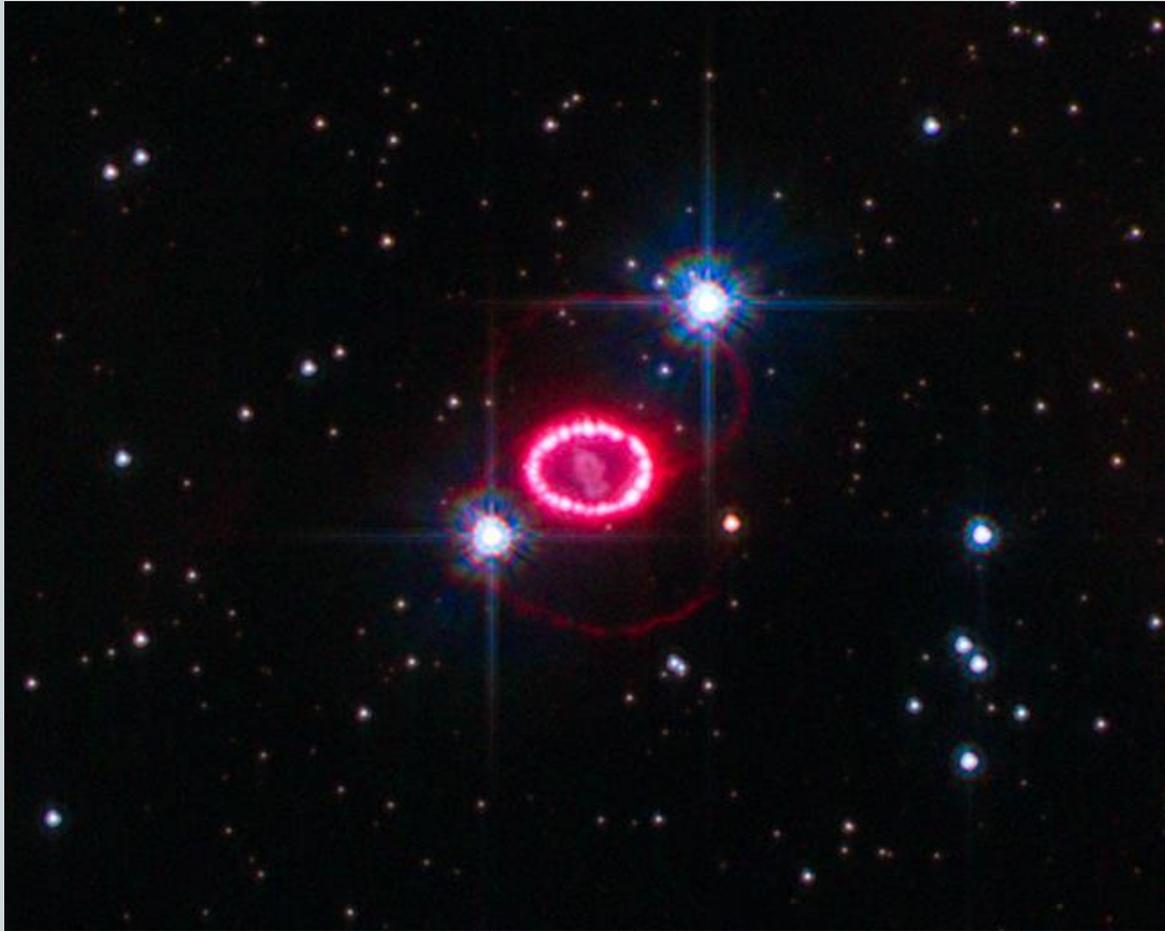
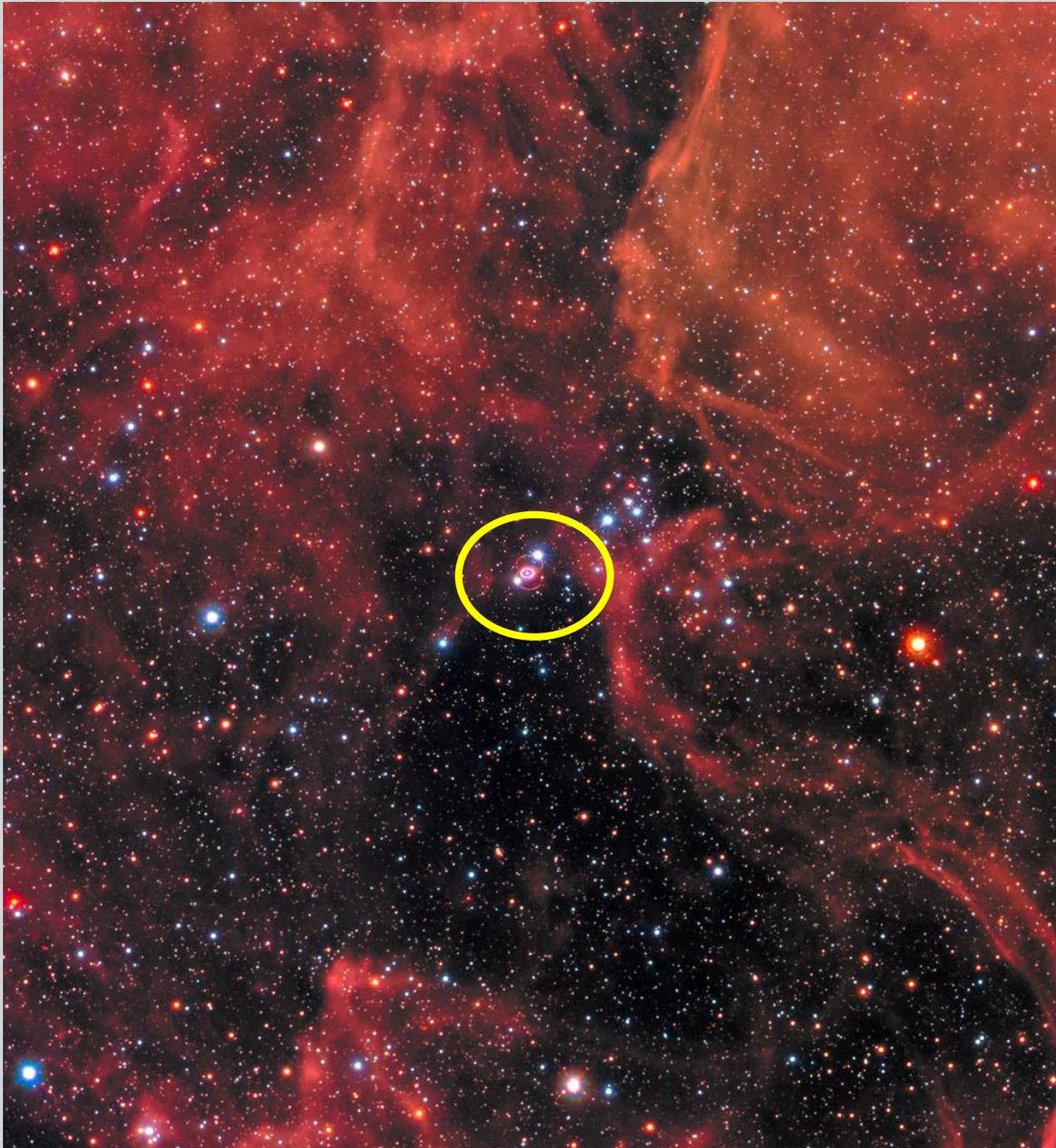


Image NASA- Hubble - 2017

Noter que la matière éjectée par la supernova elle-même est le cercle du centre de l'image. Les deux autres cercles plus faibles et plus écartés sont dus à des éjections de matière de l'étoile avant son explosion en supernova ; les deux points blancs correspondent à des étoiles d'avant ou d'arrière-plan sans rapport avec la supernova

Détails et vidéo sur :

<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/the-dawn-of-a-new-era-for-supernova-1987a>



SN 1978A est située dans  
le nuage de Magellan,  
visible dans l'hémisphère  
sud



## SN 1987A- SIMULATION ORDINATEUR

l'onde de choc se déplace derrière un anneau dense de gaz produit par la supernova.

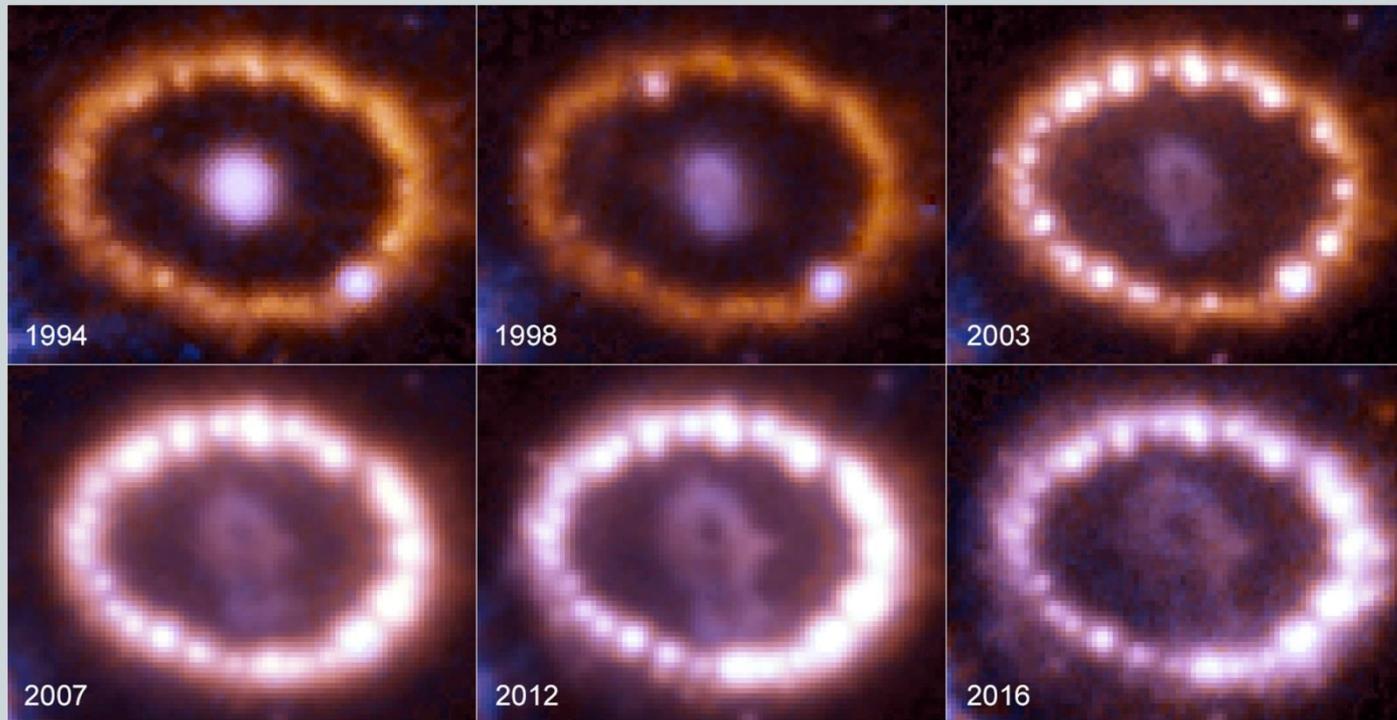


This scientific visualization, using data from a computer simulation, shows Supernova 1987A, as the luminous ring of material we see today. (2017)

Credits: NASA, ESA, and F. Summers and G. Bacon (STScI); Simulation Credit: S. Orlando (INAF-Osservatorio Astronomico di Palermo)



## SUIVI PAR HUBBLE SPACE TELESCOPE ENTRE 1994 ET 2016



Hubble studies have revealed that the dense ring of gas around the supernova is glowing in optical light and has a diameter of about a light-year. The ring was there at least 20,000 years before the star exploded. A flash of ultraviolet light from the explosion energized the gas in the ring, making it glow for decades

Astronomers also are still looking for evidence of a black hole or a neutron star left behind by the blast. They observed a flash of neutrinos from the star just as it erupted. This detection makes astronomers quite certain a compact object formed as the center of the star collapsed — either a neutron star or a black hole — but no telescope has uncovered any evidence for one yet



# SN 1987 : CE QUE L'ON POUVAIT ÉCRIRE EN 2017 (NASA)

Astronomers also are still looking for evidence of a black hole or a neutron star left behind by the blast. They observed a flash of neutrinos from the star just as it erupted. This detection makes astronomers quite certain a compact object formed as the center of the star collapsed — either a neutron star or a black hole — but no telescope has uncovered any evidence for one yet.



On soupçonne la présence d'un objet massif au cœur de la supernova mais aucun télescope ne peut le démontrer ...



# LA RÉPONSE EN 2022 AVEC LE JWST



Le JWST démontre la présence d'une étoile à neutron au centre de cette supernova SN 1987A : 'présence de gaz argon ionisé' près du centre du rémanent de la supernova

NASA's James Webb Spac...

+ Suivre

## Webb Finds Evidence for Neutron Star at Heart of Young Supernova Remnant (NIRCam, MIRI and NIRSpec Images)

Scientists had long expected supernova explosion SN 1987A to form a neutron star or black hole, but direct evidence was elusive — until now. For the first time, Webb has found ionized argon at the site, a strong indicator of a newborn neutron star's presence.

Back in 1987, observatories detected a 10-second burst of tiny particles called neutrinos, hours before SN 1987A was observed in visible light. Based on this pattern, astronomers' models demonstrated that a neutron star or black hole should have formed in the explosion. Research in the past few years showed indirect evidence of a neutron star at the core of SN 1987A's remnant, and observations of supernova remnants much older than SN 1987A confirmed many have central neutron stars.

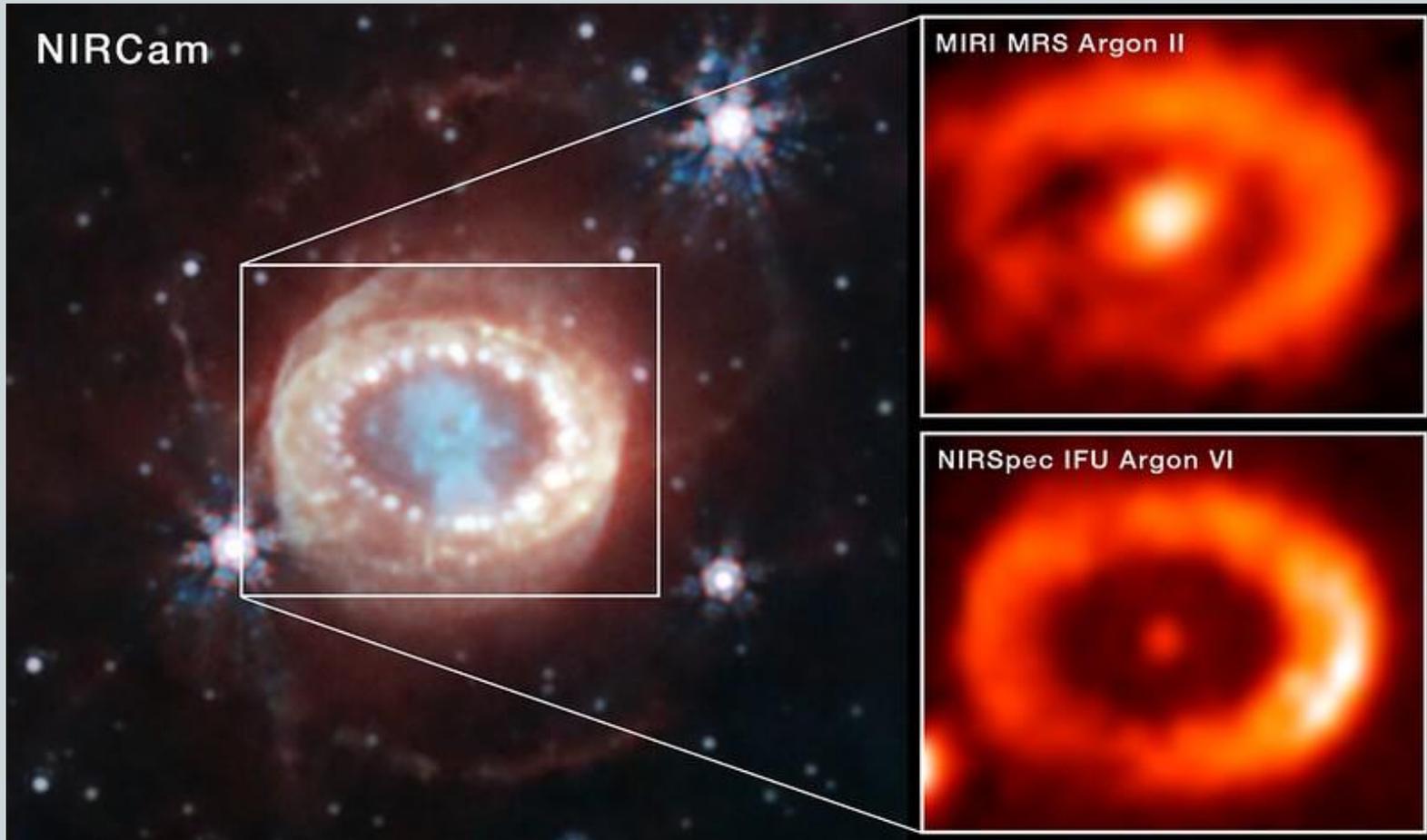
Webb is providing the latest piece in this puzzle. Scientists captured simultaneous images and spectra of SN 1987A with Webb in July 2022 (making it one of the very first objects seen by Webb!), using an instrument mode where a spectrum is taken for every image pixel. Analysis of Webb's spectra shows a signature of ionized argon from near the center of the remnant that could only be created by a source of high-energy radiation. According to the research team, only a few scenarios are likely, and all of them involve a baby neutron star. More observations of this supernova remnant will be forthcoming from both Webb and other ground-based observatories. Scientists hope for even greater clarity of what is happening at SN 1987A's heart.

Learn more: [go.nasa.gov/4bJKzFI](https://go.nasa.gov/4bJKzFI)



# SN 1987A (JWST NIRCAM IMAGE)

A droite, photos ‘ émission de gaz argon ionisé ’ au centre de la supernova



# SN 1987A : IMAGE AVEC LE JWST



# EVOLUTION DES SUPERNOVÆ

La matière expulsée par une supernova s'étend dans l'espace, formant un type de nébuleuse appelé **rémanent de supernova**.

La durée de vie de ce type de nébuleuse est relativement limitée, la matière étant éjectée à très grande vitesse (plusieurs milliers de km /s), le rémanent se dissipe relativement vite à l'échelle astronomique, en quelques centaines de milliers d'années.

La nébuleuse des **Dentelles du Cygne (Veil nebula)** est un des exemples de rémanents de supernova dans un état très avancé de dilution dans le milieu interstellaire. L'étoile aurait explosé il y a 8000 ans environ.



## Les Dentelles du Cygne

NASA : dimension globale 110 al, couvrant l'équivalent de 6 lunes dans le ciel. Distance 2 100 al dans la constellation du Cygne

NGC 6992 & NGC 6960

AL



# RÉMANENT DE SUPERNOVA : LES DENTELLES DU CYGNE



# DÉTAIL NGC6960 IMAGE HUBBLE 2015



NGC 6992

AL



FIN



SHIVA : dieu de la destruction et de la renaissance

*Nous sommes faits de poussières d'étoiles – Carl Sagan*

