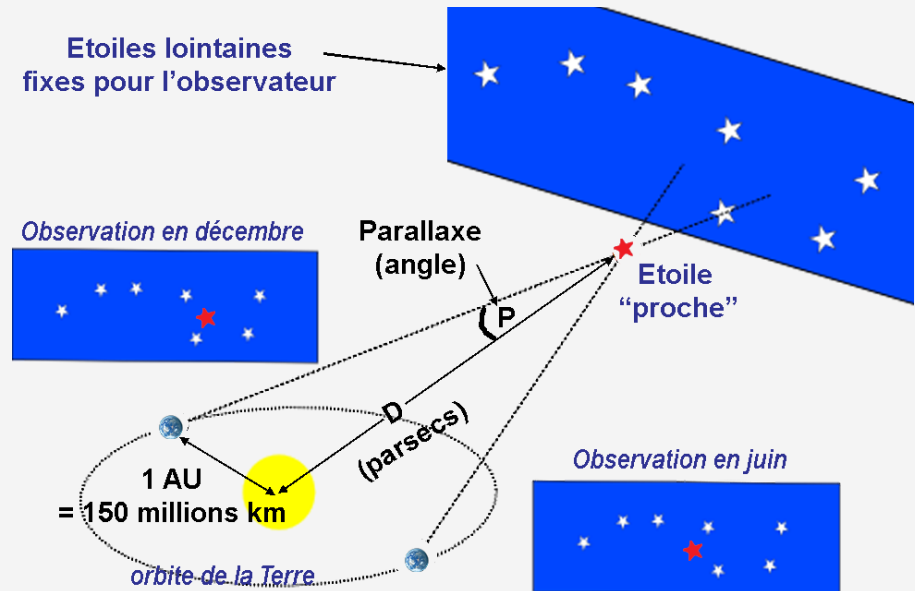
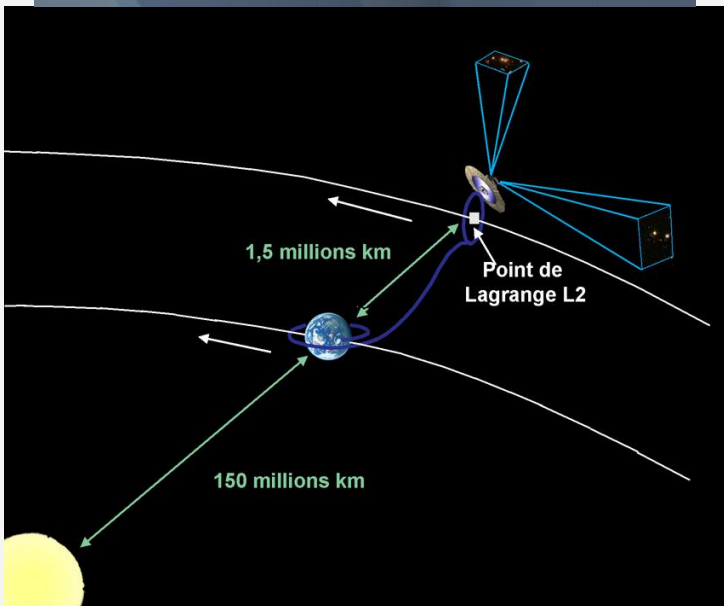
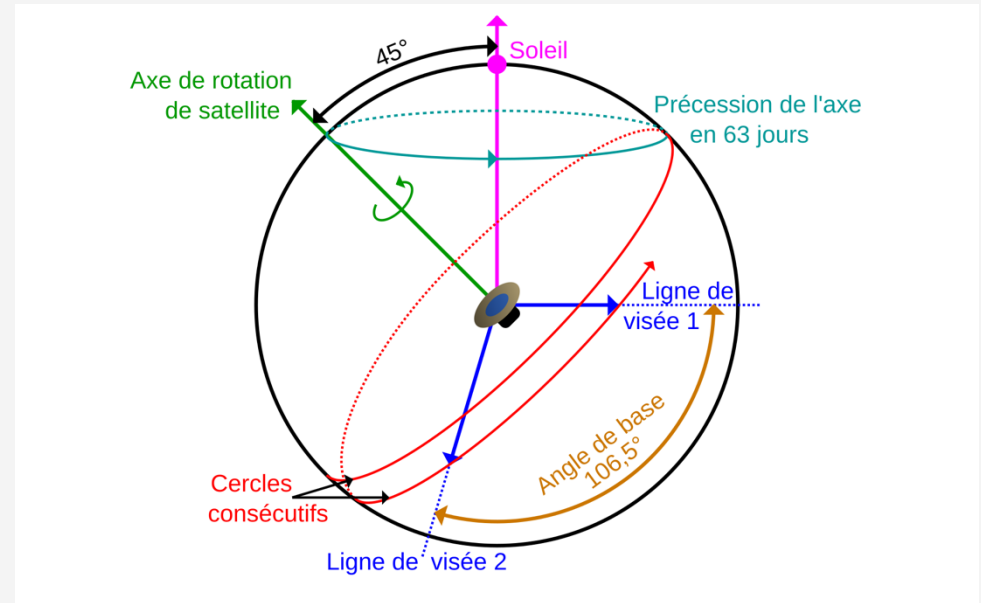
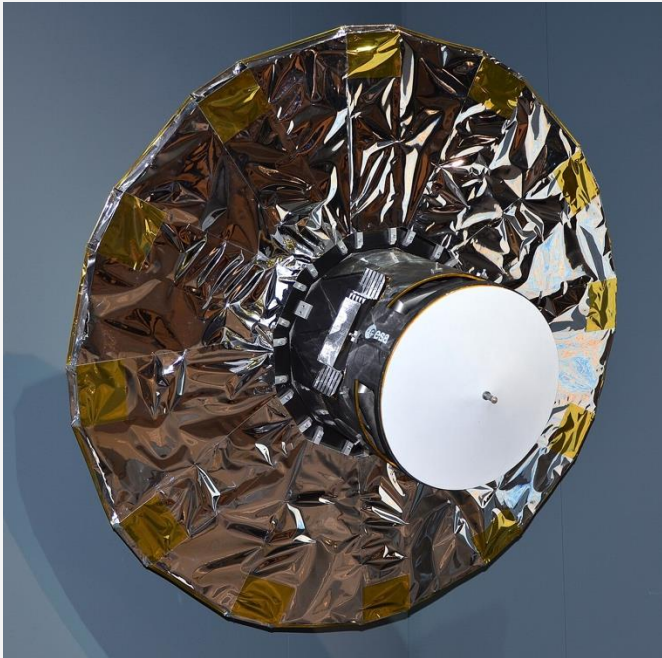


Chapitre 8

Structure et évolution stellaires

La mission spatiale Gaia (12.2013-03.2025)



DR3: 1.8 milliard d'étoiles, 1.5 milliard avec
luminosité, couleur, position
(moins de $\sim 1\%$ des étoiles de la Voie Lactée)



Diagramme HR de la Voie Lactée par Gaia

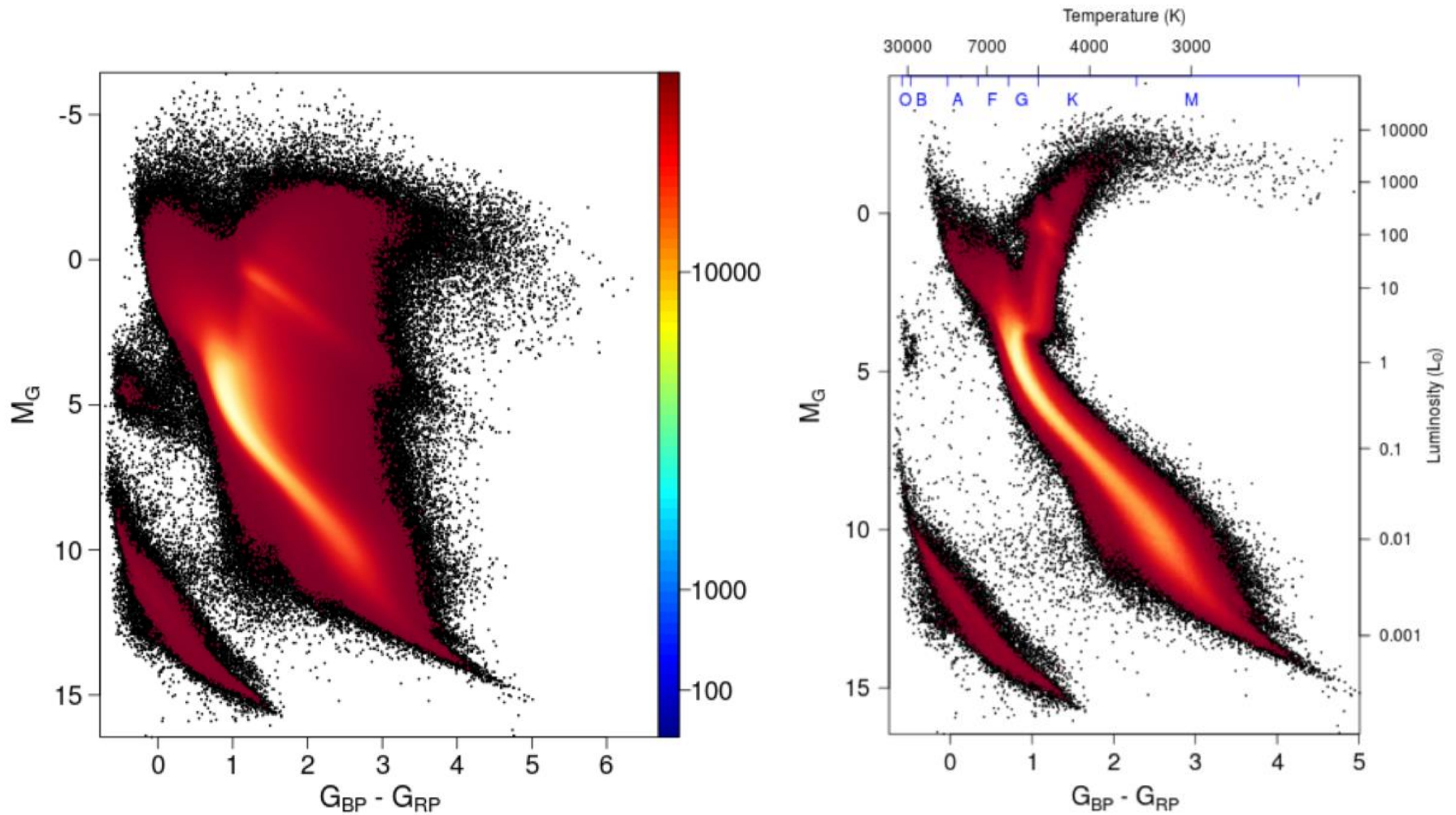


Fig. 1. Full *Gaia* colour-magnitude diagram of sources with the filters described in Sect. 2.1 applied (65,921,112 stars). The colour scale represents the square root of the relative density of stars.

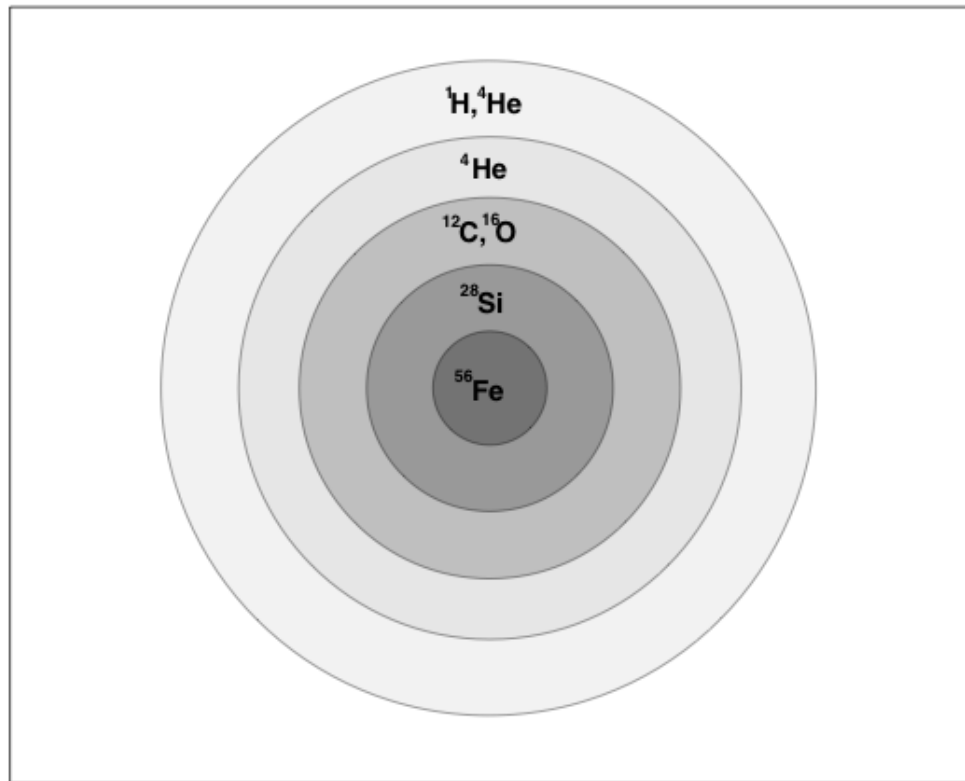
Structure et évolution stellaires

- Description de la structure interne des étoiles
- Naissance des étoiles
- Les différentes phases de « vie » des étoiles
- Les différentes « morts » possibles
- Evolution vers des objets ultra-compactes
- Recyclage des éléments dans les nébuleuses

Réactions nucléaires au sein des étoiles

Les réactions nucléaires

La vie d'une étoile est une succession de contractions et de réactions nucléaires, toujours plus énergétiques. Les éléments se forment à tour de rôle en « pelures d'oignons » dans le cœur de l'étoile



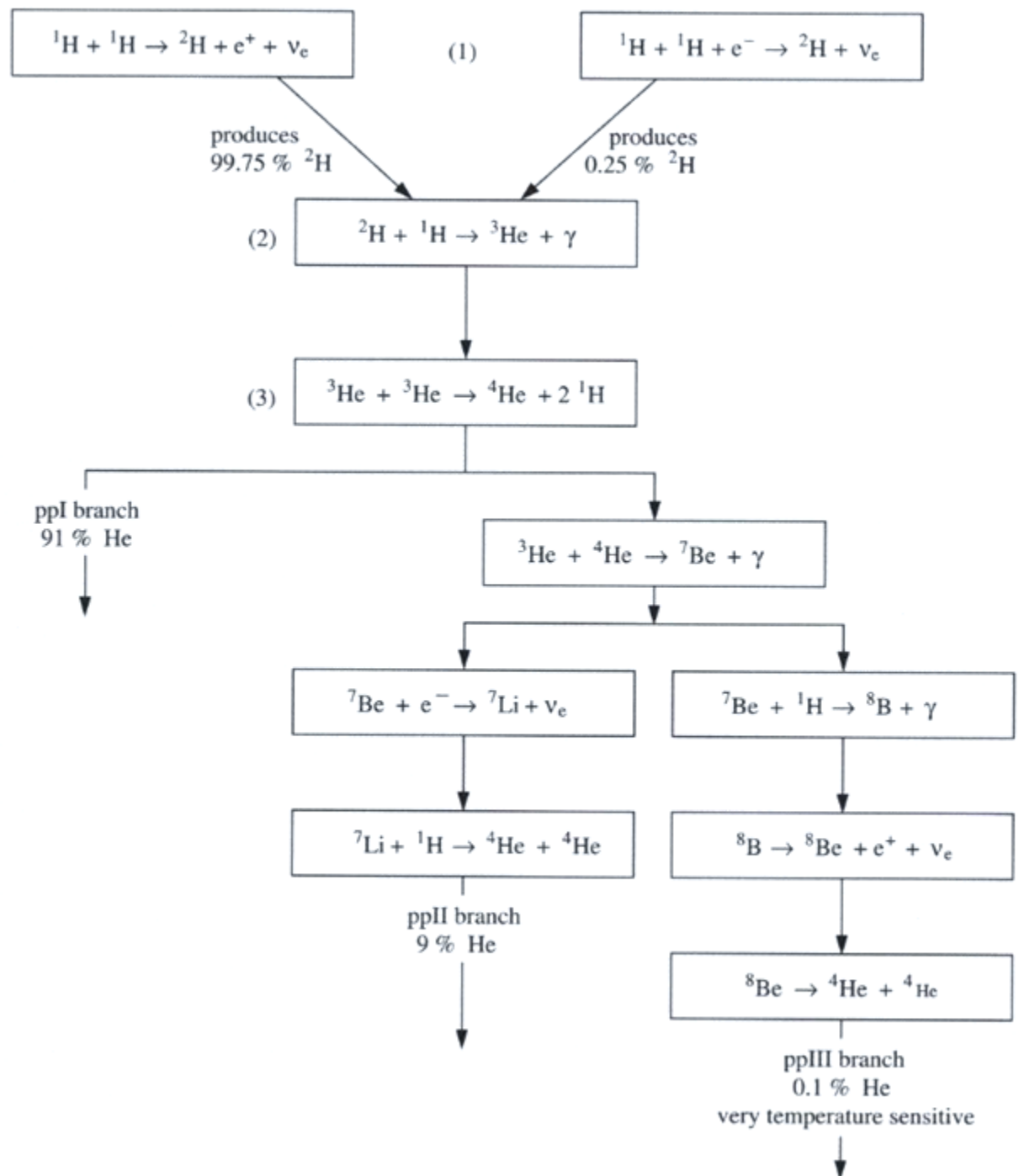
Chaîne(s) proton-proton

Etoiles de masse
 $M < 1,5 M_{\odot}$
 $T > 4 \times 10^6 \text{ K}$

Les neutrons sont
 produits par
désintégration Beta
 de protons:

Désintégration β^+
 $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$

Désintégration β^-
 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$



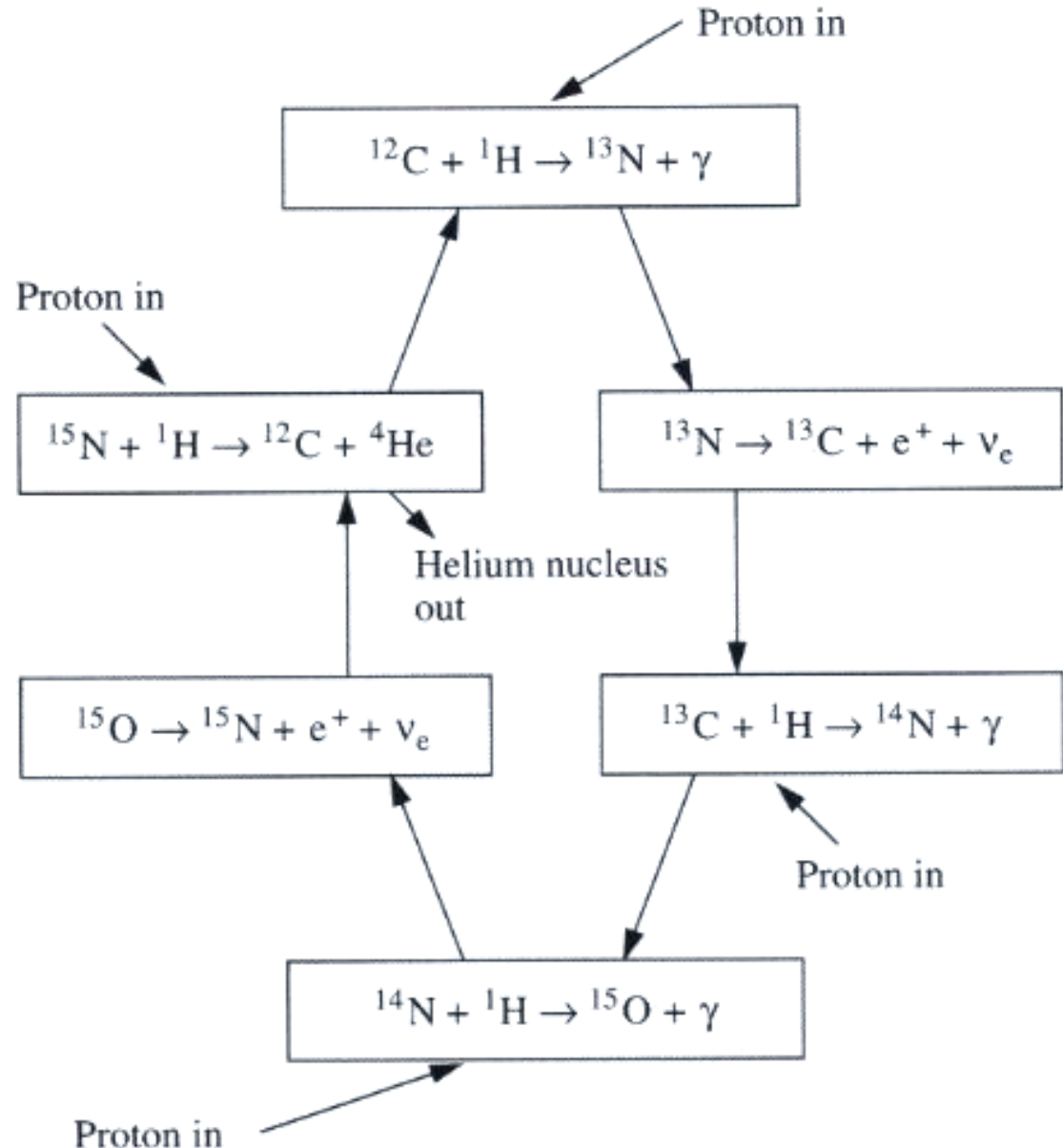
Cycle CNO



Etoiles de masse
 $M > 1,5 M_{\odot}$
 $T > 1,2 \times 10^7 \text{ K}$

Réaction plus
énergétique que
la chaîne pp mais
produit plus de
neutrinos

-> moins d'énergie
retenue dans
l'étoile



Neutrinos Solaires

Problème des neutrinos Solaires

Les neutrinos sont des particules de très faible masse et de très petite section efficace.

Il existe 3 types de neutrinos:

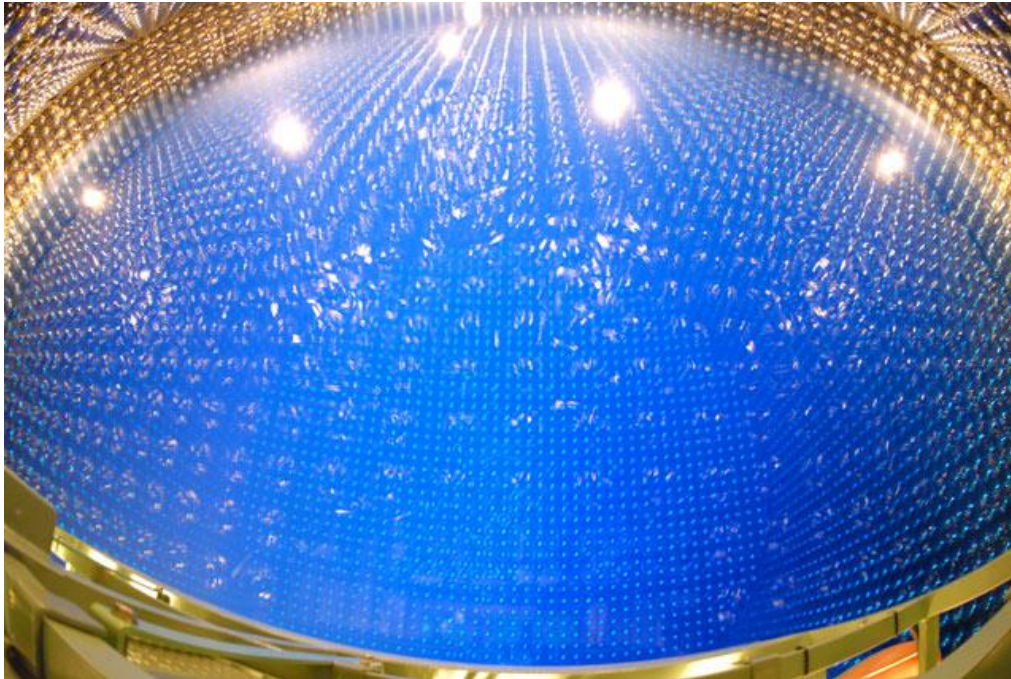
- électronique
- muonique
- tauique

L e p t o n s	Masse	0,511 MeV/c ²	105 MeV/c ²	≈ 1777 MeV/c ²
	Charge	-1	-1	-1
	Spin	1/2	1/2	1/2
				
		électron	muon	tauon
		< 0,0000022 MeV/c ²	< 0,17 MeV/c ²	< 15,5 MeV/c ²
				
		neutrino élect.	neutrino muon.	neutrino tauique
	Gén	1ère	2ème	3ème

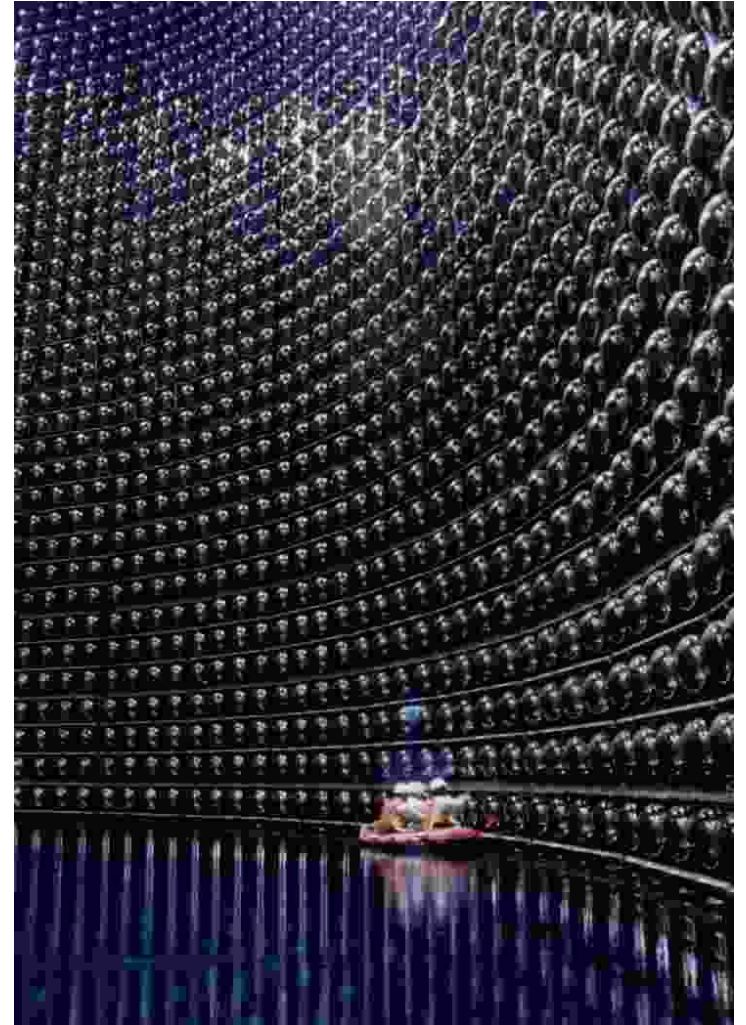
L'expérience « Super-Kamiokande » au Japon détecte trop peu de neutrinos électroniques par rapport au flux prédit par la théorie

Problème des neutrinos Solaires

« Super-Kamiokande » : cylindre de 50000 tonnes d'eau et détecteurs **Cherenkov** (tubes photomultiplicateurs)



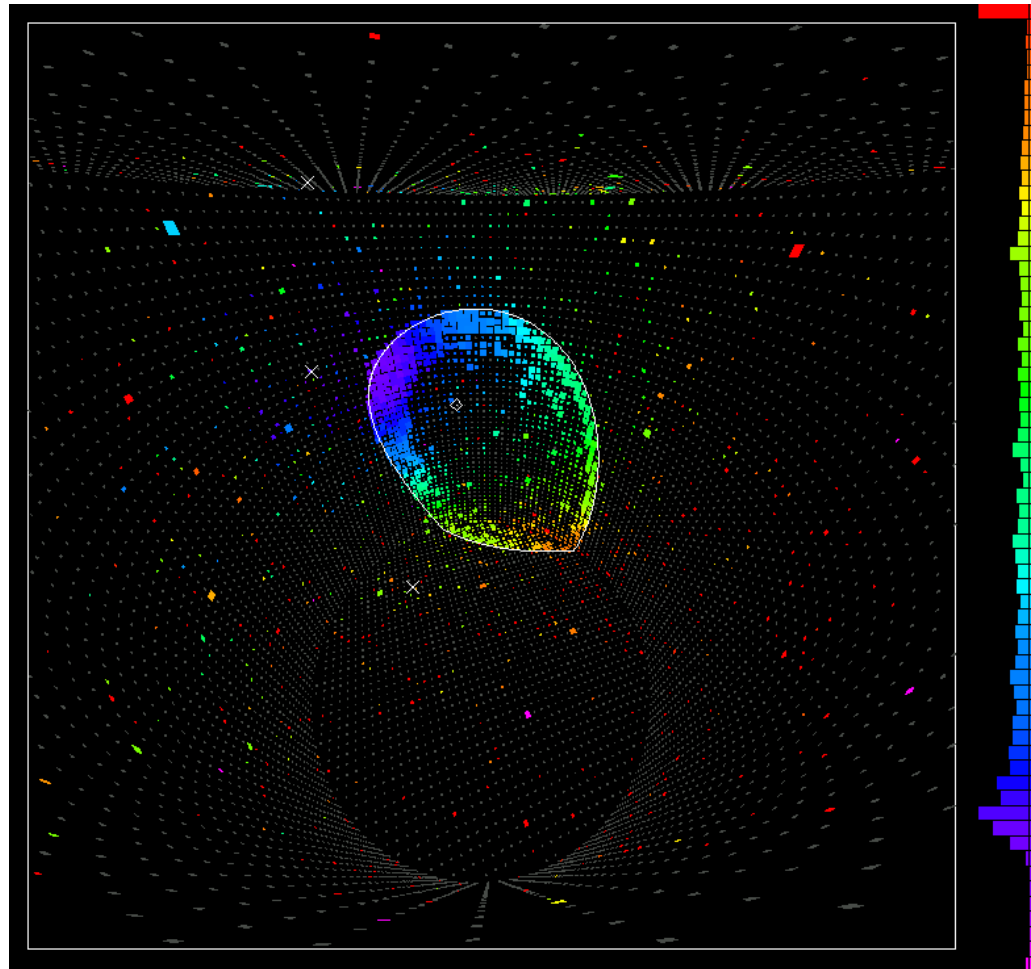
Le détecteur est situé sous une montagne pour éviter la contamination par les « rayons cosmiques »



Problème des neutrinos Solaires

Les neutrinos interagissent avec l'oxygène des molécules d'eau, produisant un électron allant plus vite que la lumière (dans l'eau). On a émission d'un cône de **lumière Tcherenkov** dans le sens du mouvement.

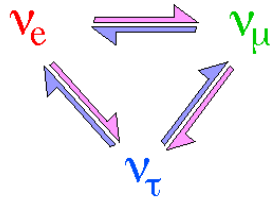
Les couleurs indiquent le temps d'arrivée des photons sur les détecteurs



Problème des neutrinos Solaires

L'expérience « Super-Kamiokande » détecte trop peu de neutrinos électroniques par rapport au flux prédit par la théorie

La théorie prédit aussi que les neutrinos peuvent « osciller » d'une espèce à l'autre **s'ils ont une masse**



Dans l'hypothèse que les neutrinos oscillent on arrive à montrer à la fois

- 1- que le déficit de neutrinos électroniques est compatible avec l'oscillation d'une espèce à l'autre
 - 2- que les neutrinos ont une masse puisqu'ils « oscillent » !
- > candidat pour la matière sombre (mais insuffisant pour expliquer la totalité de la matière sombre).

Naissance des étoiles



Naissance des étoiles

Contraction d'un nuage primordial, si la masse initiale est suffisante, c'est-à-dire si $M > M_{\text{Jeans}}$.

VIRIEL
$$-\frac{3}{5} \frac{GM^2}{R} + \frac{3MkT}{\bar{m}} = 0$$

$$R_{\text{Jeans}} = \sqrt{\frac{15kT}{4\pi\rho G\bar{m}}}$$

R_{Jeans} : rayon au-dessus duquel un nuage se contracte

Naissance des étoiles

Contraction (et fractionnement éventuel) sur des échelles de temps de l'ordre du temps de chute libre (ff: free-fall)

$$t_{\text{ff}} = \frac{P}{2} = \sqrt{\frac{3\pi}{32G\rho}}$$

Ordres de grandeur (Chapitre 2)

Objet	ρ (kg m ⁻³)	t_{ff}
Univers	10^{-27}	10^{11} ans
Galaxie	10^{-21}	10^8 ans
Milieu interstellaire	$10^{-21} / 10^{-17}$	$10^5 / 10^8$ ans
Système solaire	10^{-12}	10^3 ans
Soleil	1400	1800 s



Naissance des étoiles

- Temps de chute libre:

Temps nécessaire pour se contracter en un point sans qu'aucune force ne compense la gravité. $T \sim 30$ min pour le Soleil.

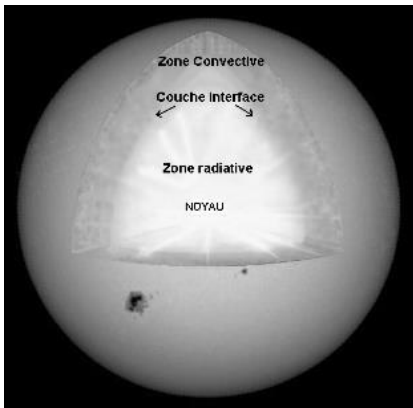
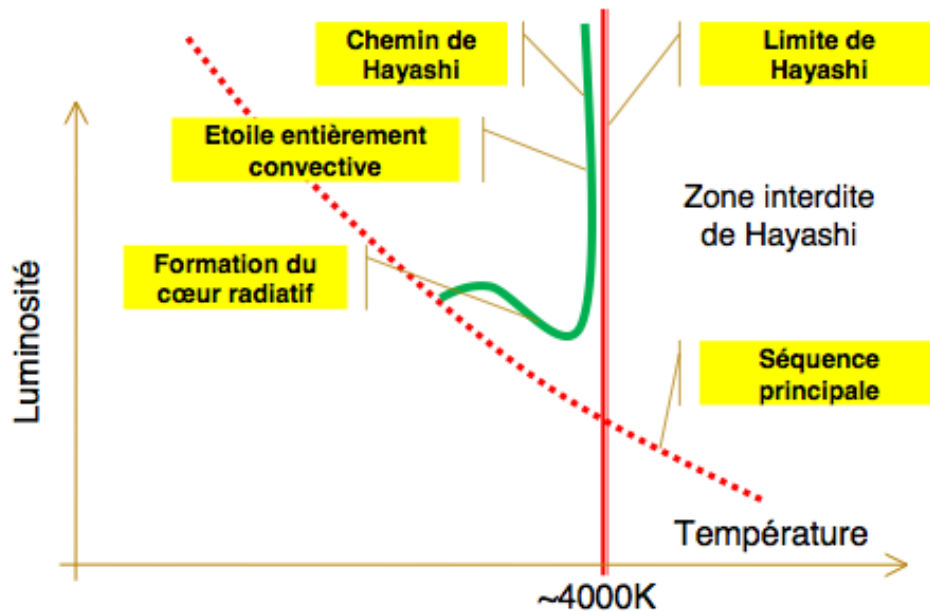
- Temps thermique:

Temps nécessaire pour rayonner toute son énergie si l'on coupait d'un coup les réactions nucléaires. $T \sim 2 \times 10^7$ ans pour le Soleil.

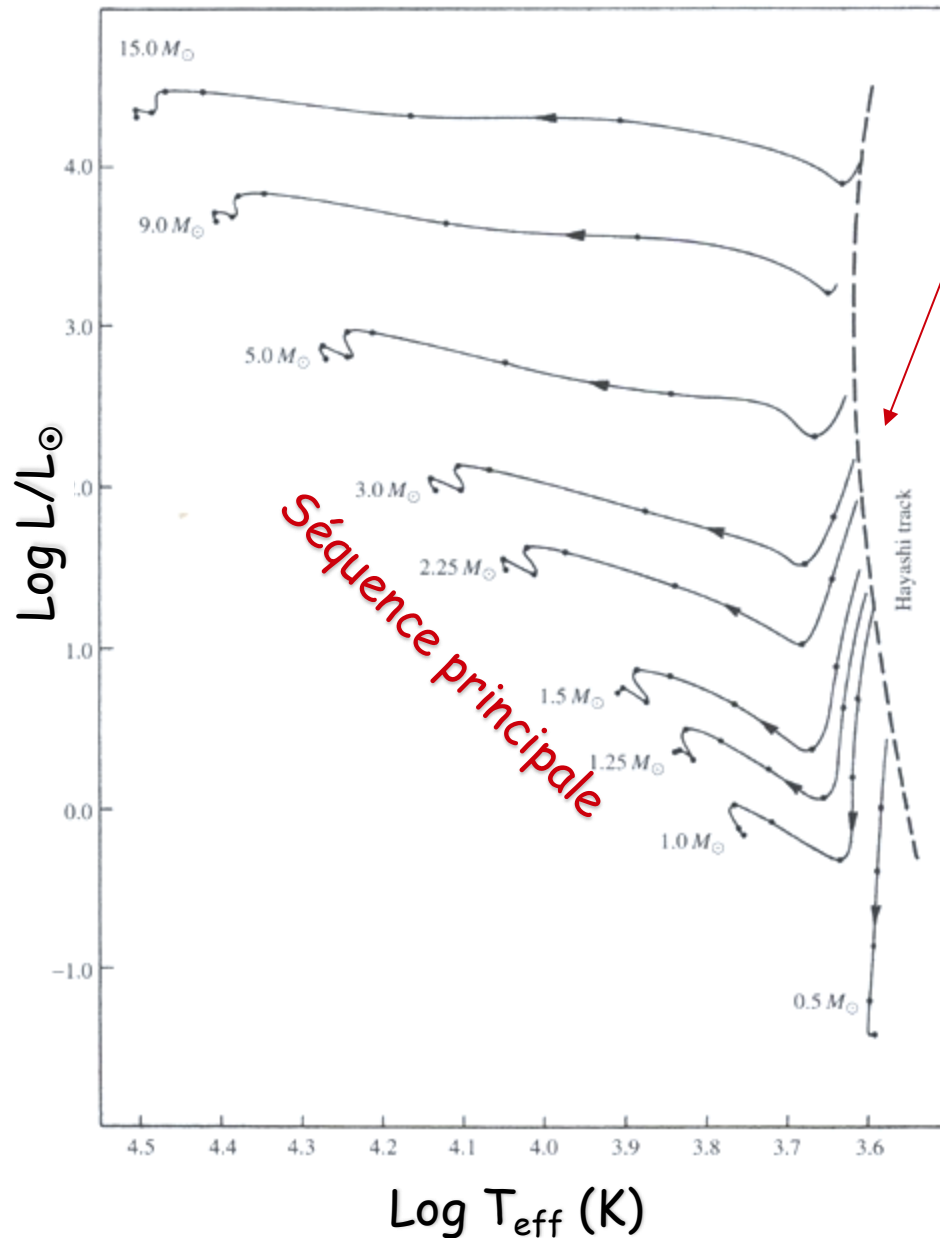
- Temps nucléaire:

Temps nécessaire pour rayonner toute l'énergie nucléaire.
 $T \sim 10^{10}$ ans pour le Soleil.

Limite de Hayashi



- Comme les protoétoiles sont initialement totalement convectives leur contraction gravitationnelle entraîne des instabilités. Seules certaines conditions thermiques sont permises pour que l'étoile puisse se former.
- Dans la région à gauche de la limite, la protoétoile convective reste stable en équilibre hydrostatique, elle évolue calmement sur le chemin de Hayashi, puis elle amorce son cœur nucléaire qui se dote d'une enveloppe radiative. La proto étoile se dirige vers la séquence principale.
- Dans la région de droite, la protoétoile trop froide garde un cœur convectif qui la rend instable et empêche la formation d'un noyau radiatif : C'est la zone interdite de Hayashi.



Séquence de Hayashi

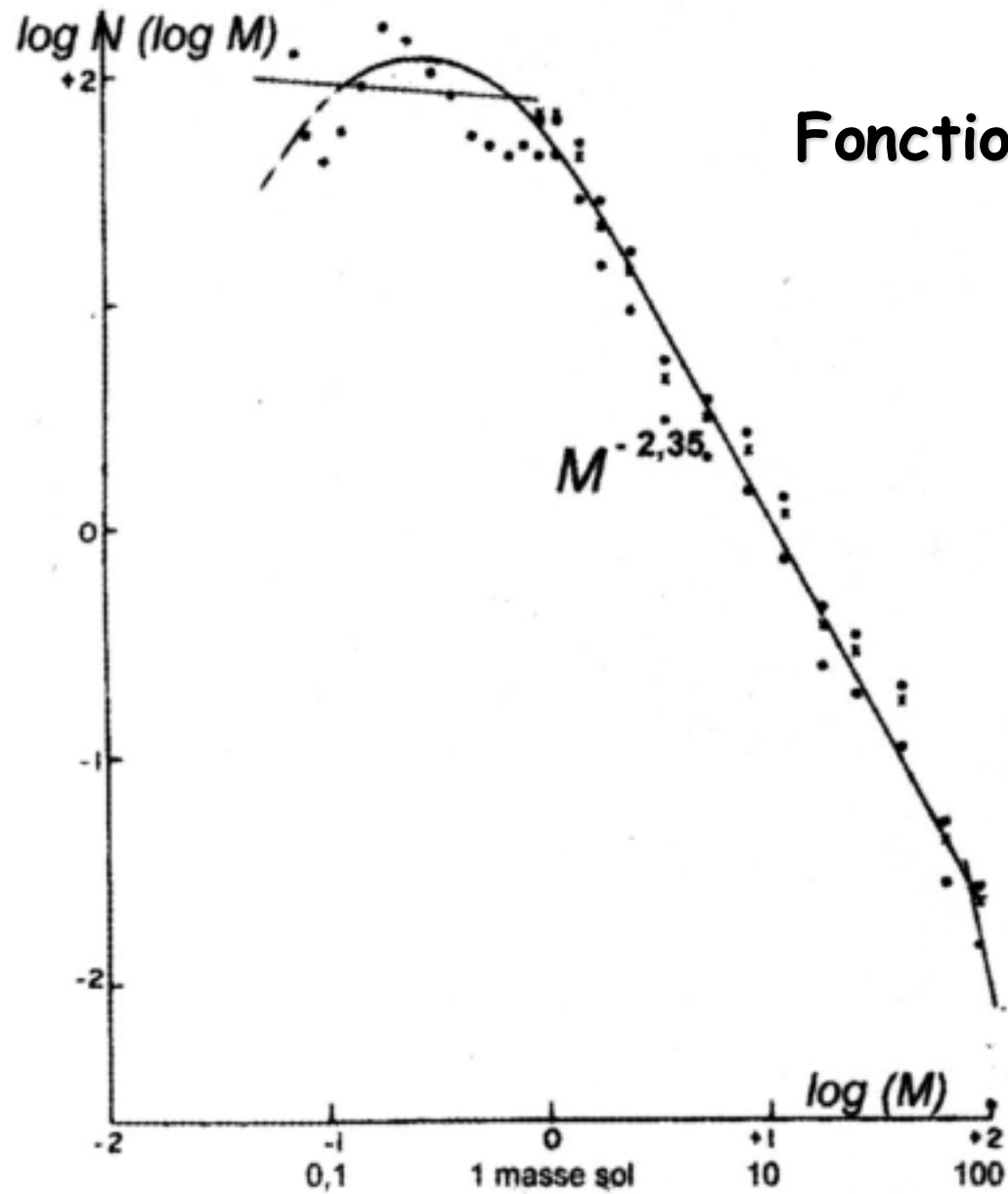
Ligne pratiquement droite et verticale dans le diagramme HR, sur laquelle se trouvent toutes les étoiles totalement convectives.

Une étoile en formation arrive depuis la droite sur le trajet de Hayashi.

Lorsque l'étoile atteint ce stade, la contraction est freinée par la pression croissante (l'opacité du milieu devient significative, retenant l'énergie gravitationnelle produite, qui doit être évacuée par la convection).

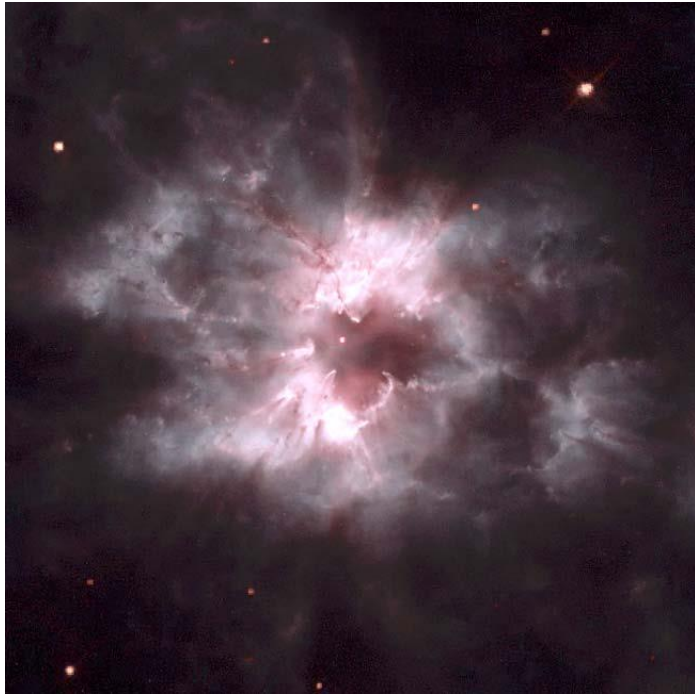
La position verticale de cette ligne indique que l'évolution de l'étoile sur le trajet de Hayashi, est isotherme. Sa luminosité baisse, ce qui ne peut s'expliquer que par une diminution du rayon de l'étoile, qui se contracte lentement.

Au cours de la contraction, la température centrale augmente, jusqu'à l'allumage de la fusion de l'hydrogène au centre. Alors, l'étoile quitte le trajet de Hayashi vers la gauche, sa température superficielle augmentant.



Fonction initiale de masse

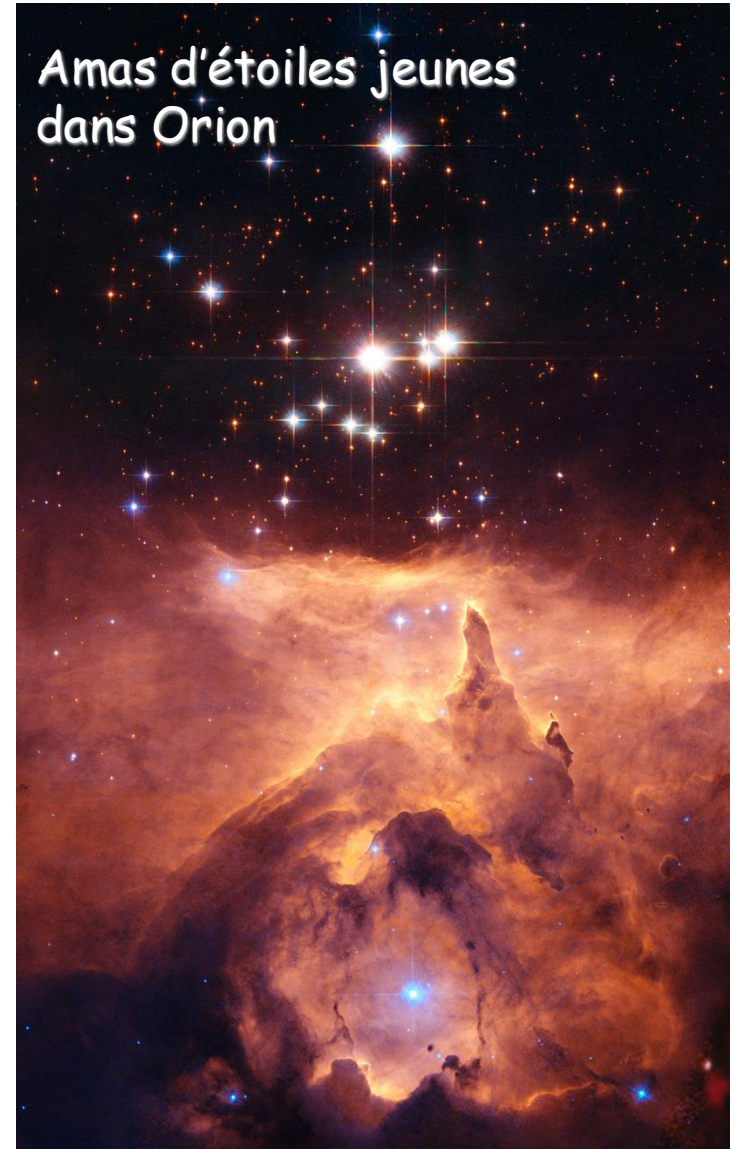
Les étoiles naissent en groupe: amas d'étoiles jeunes (amas dits « ouverts »)



Age de quelques
millions d'années



Amas des Pleiades



Amas d'étoiles jeunes
dans Orion



NGC 602 in the LMC: Hubble Heritage Image

CoKu Tau1

500 AU
└────────┘

DG Tau B

└────────┘

Haro 6-5B

└────────┘

IRAS 04016+2610

└────────┘

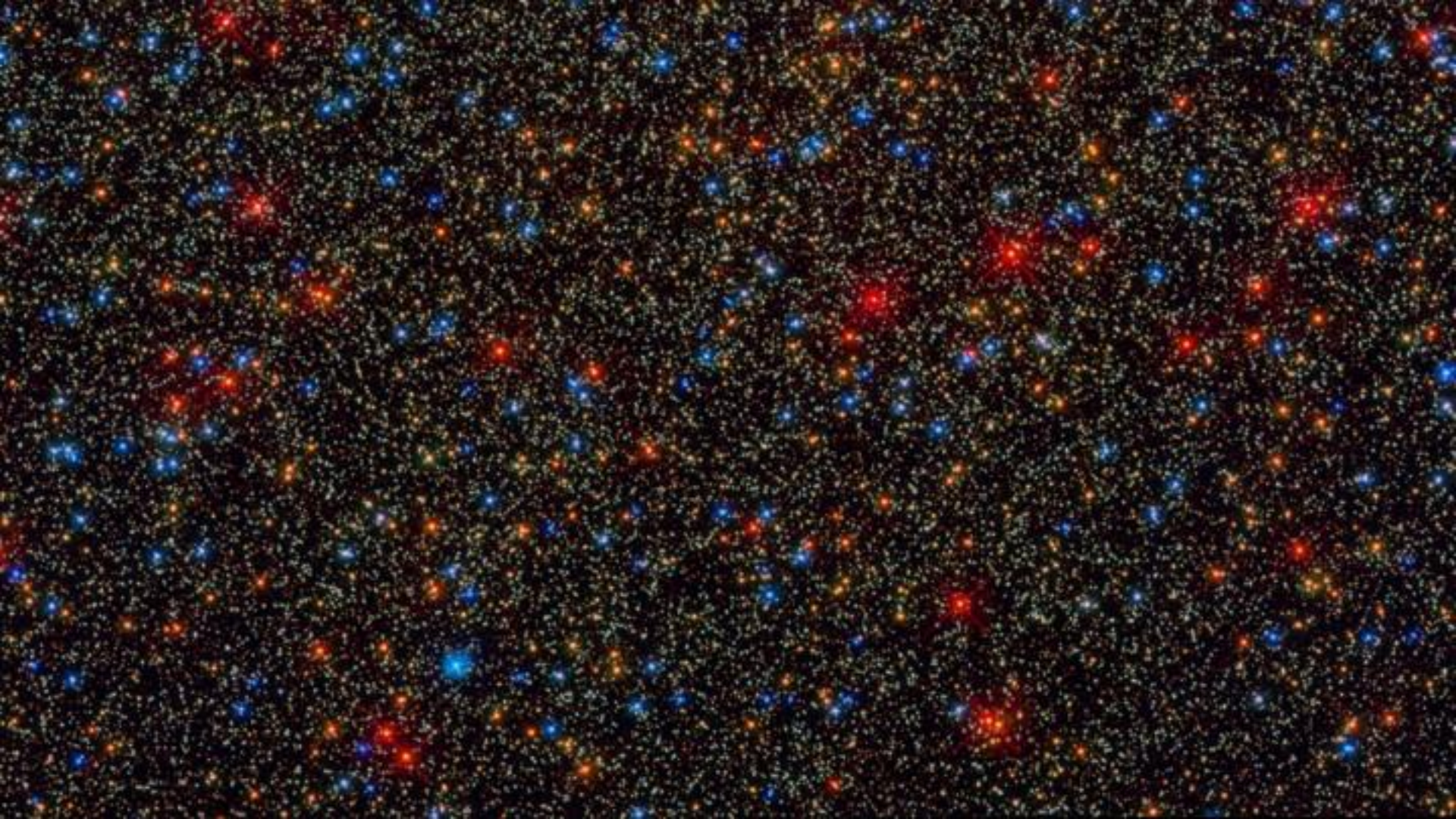
IRAS 04248+2612

1 UA
└────────┘

IRAS 04302+2247

└────────┘

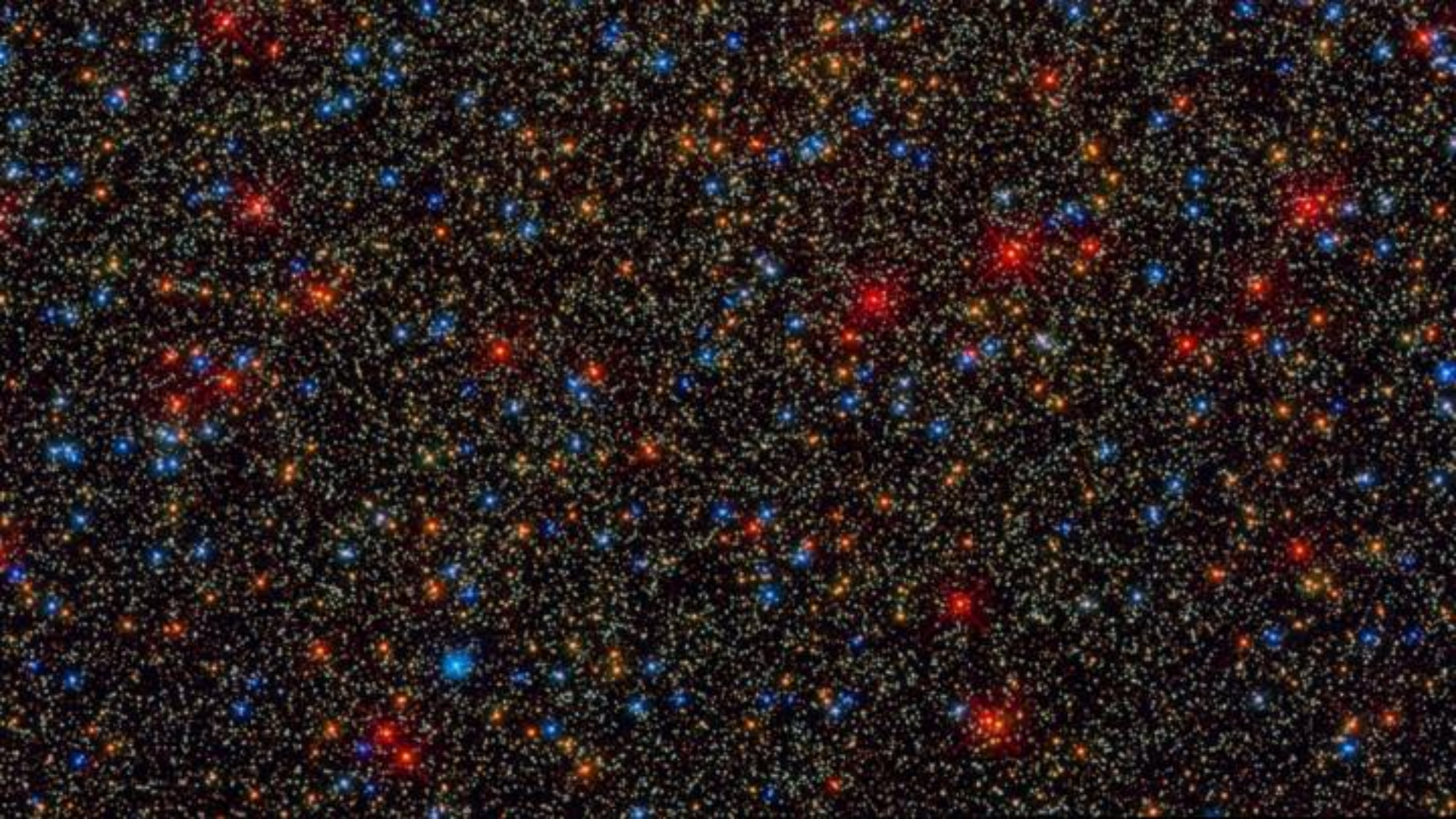
Young Stellar Disks in Infrared Hubble Space Telescope • NICMOS



Making a Color-Magnitude Diagram for Globular Cluster Omega Centauri

Jay Anderson,
STScI

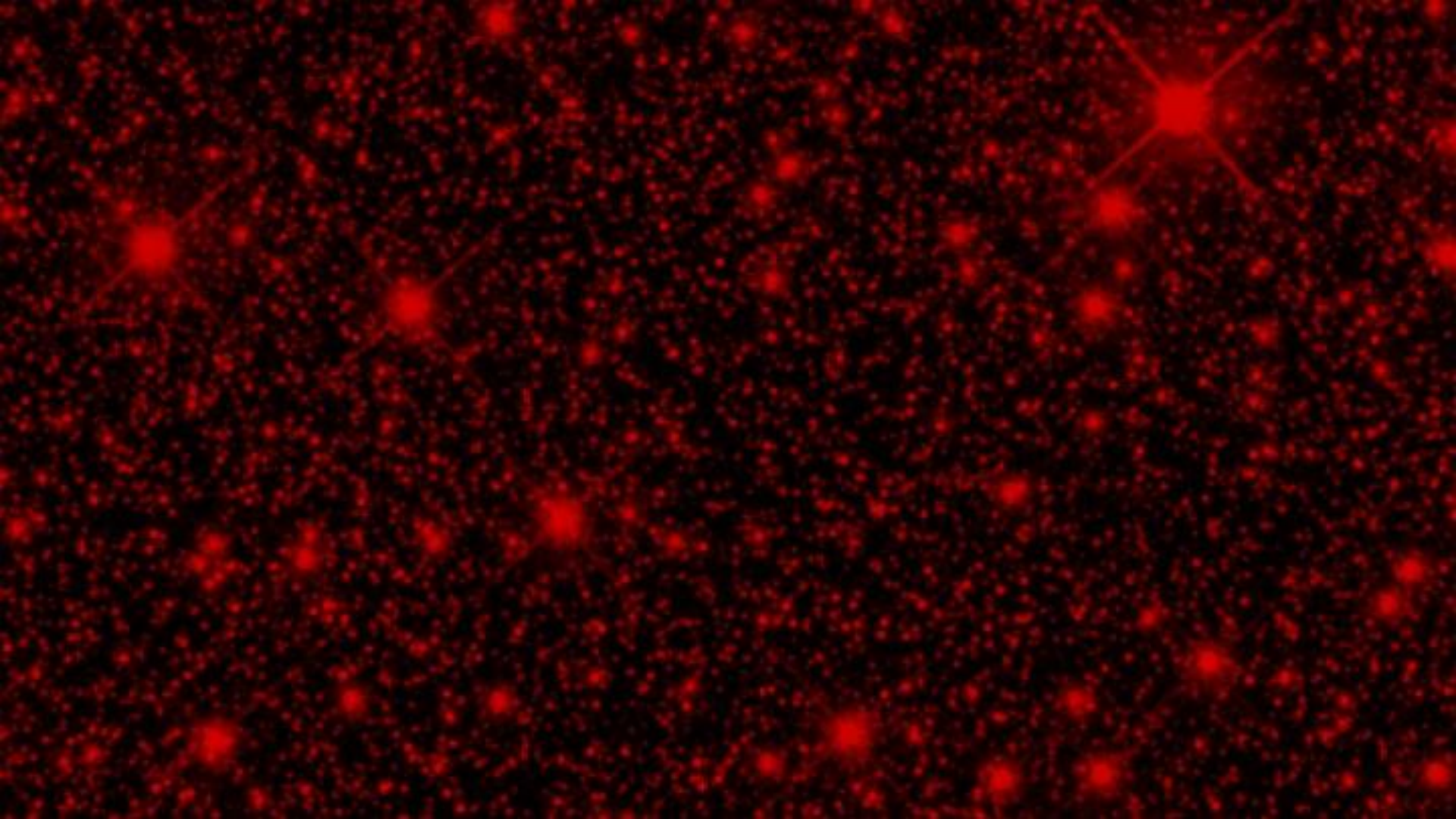




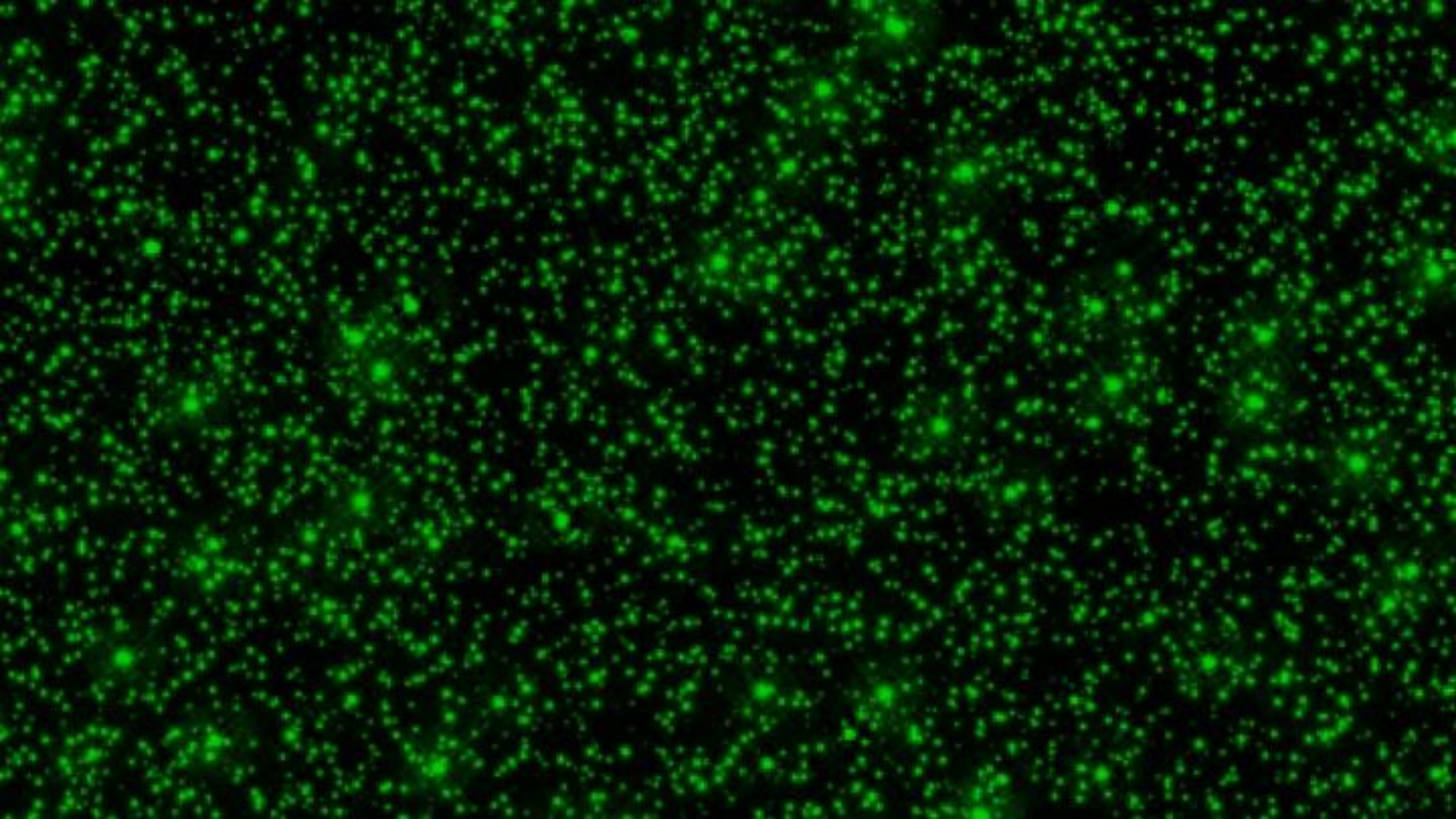
This is the Early-Release Image of Omega Centauri,
taken by WFC3/UVIS on board the Hubble Space
Telescope (HST)



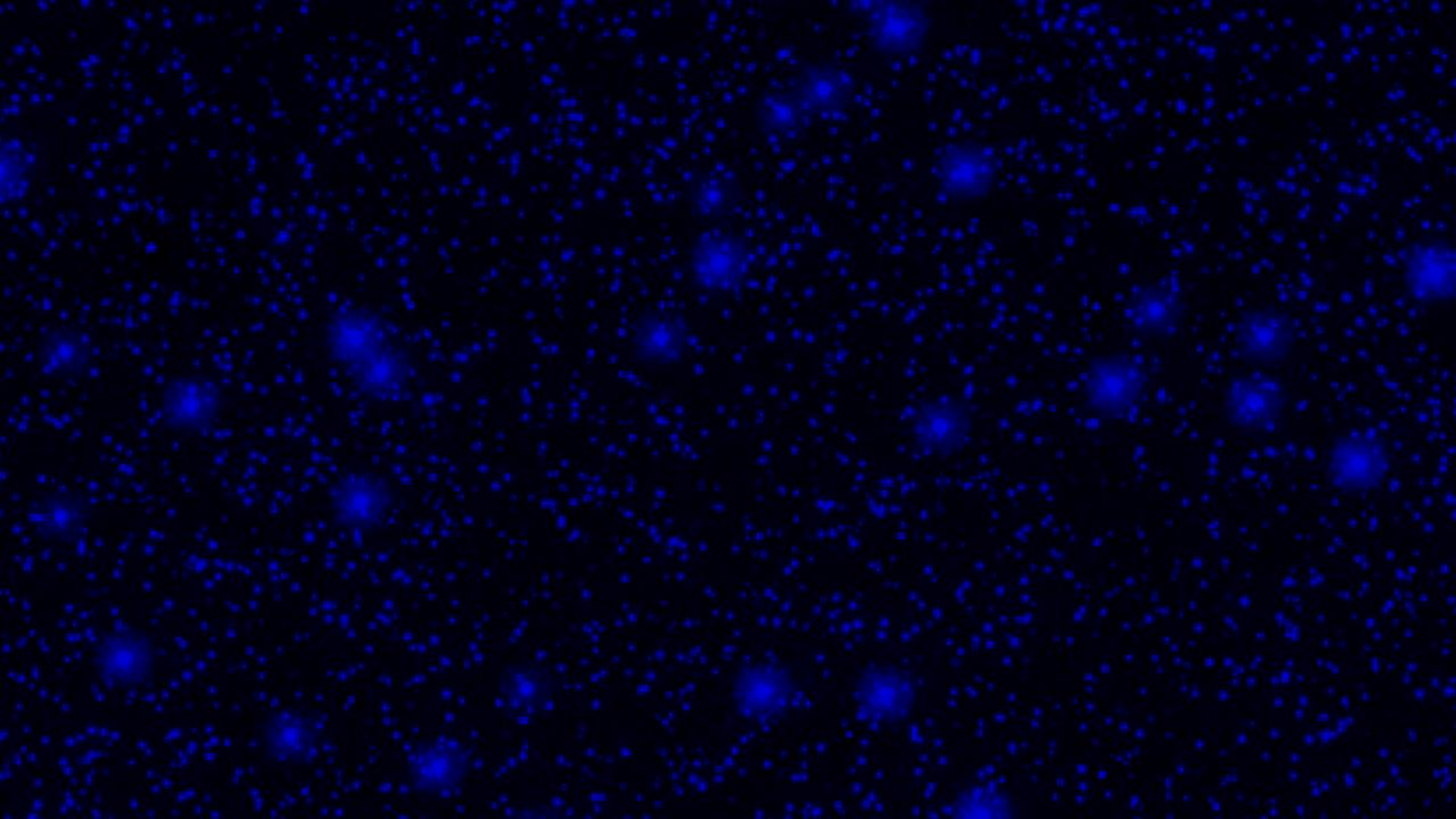
This image was made by combining
separate red, green, and blue images.



The **red** image is from filter F814W,
which sees only very red light.



The **green** image is from filter F336W,
which sees only blue light.



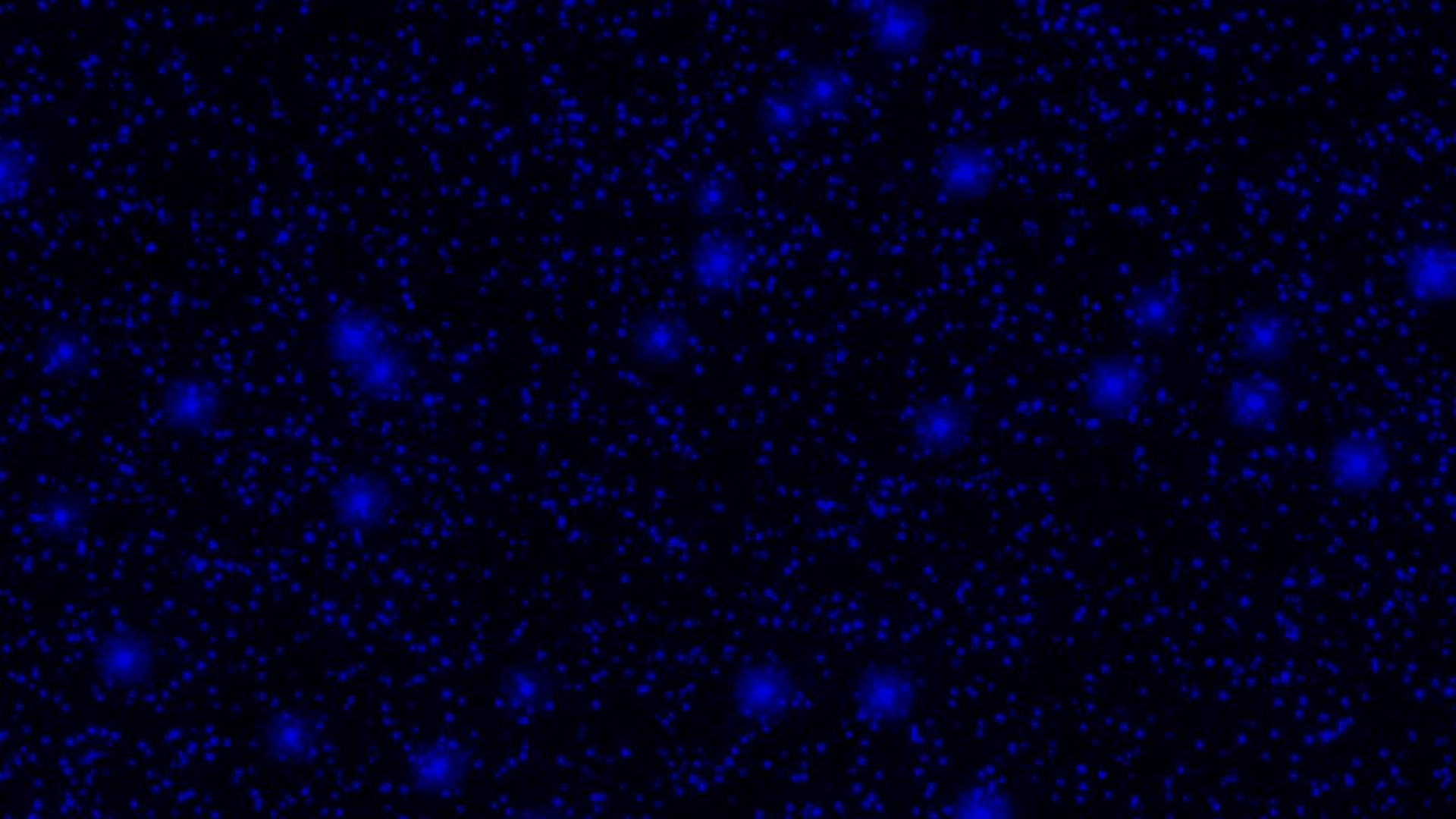
The **blue** image is from filter F225W,
which sees only ultra-violet light.



The combined image again.



The colors are so extreme because...



... the **red** stars have almost no **blue** light,
and the **blue** stars have almost no **red** light.



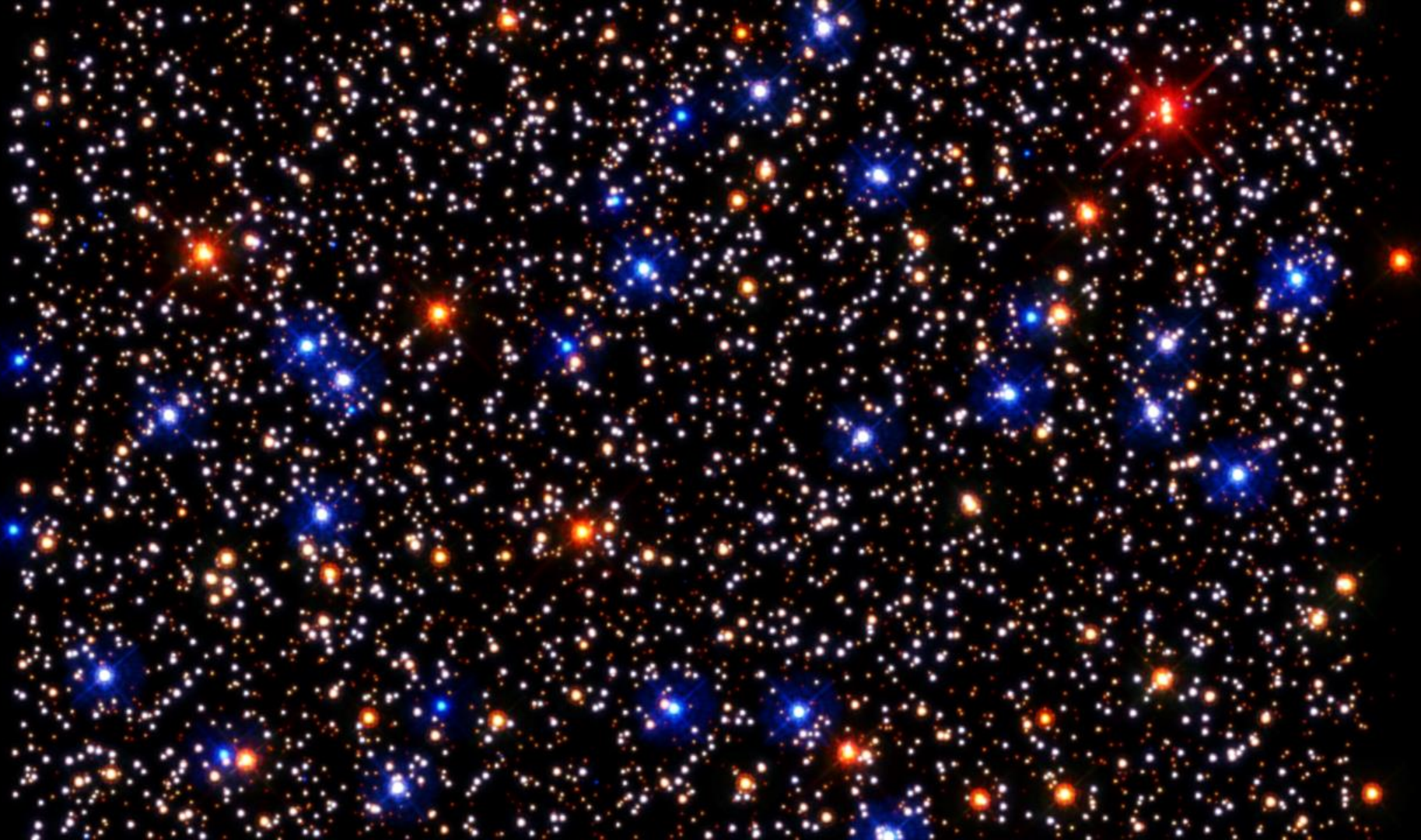
The composite image again.



Astronomers like to study the colors of stars in a quantitative way.



They like to sort the stars by color,
putting the **blue** stars on the left and
the **red** stars on the right.



They like to sort the stars by color,
putting the **blue** stars on the left and
the **red** stars on the right.



They like to sort the stars by color,
putting the **blue** stars on the left and
the **red** stars on the right.



They like to sort the stars by color,
putting the **blue** stars on the left and
the **red** stars on the right.



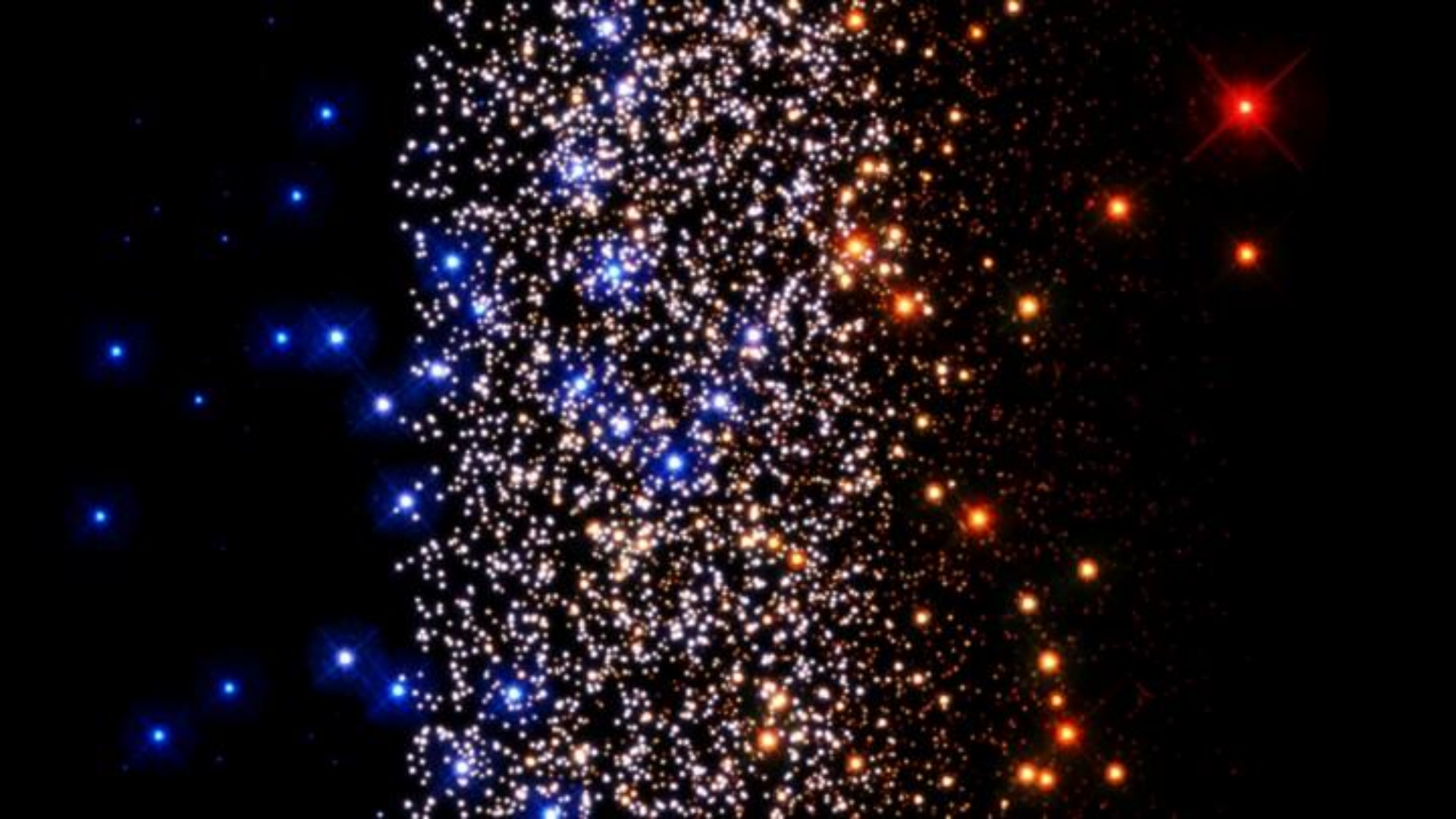
They like to sort the stars by color,
putting the **blue** stars on the left and
the **red** stars on the right.



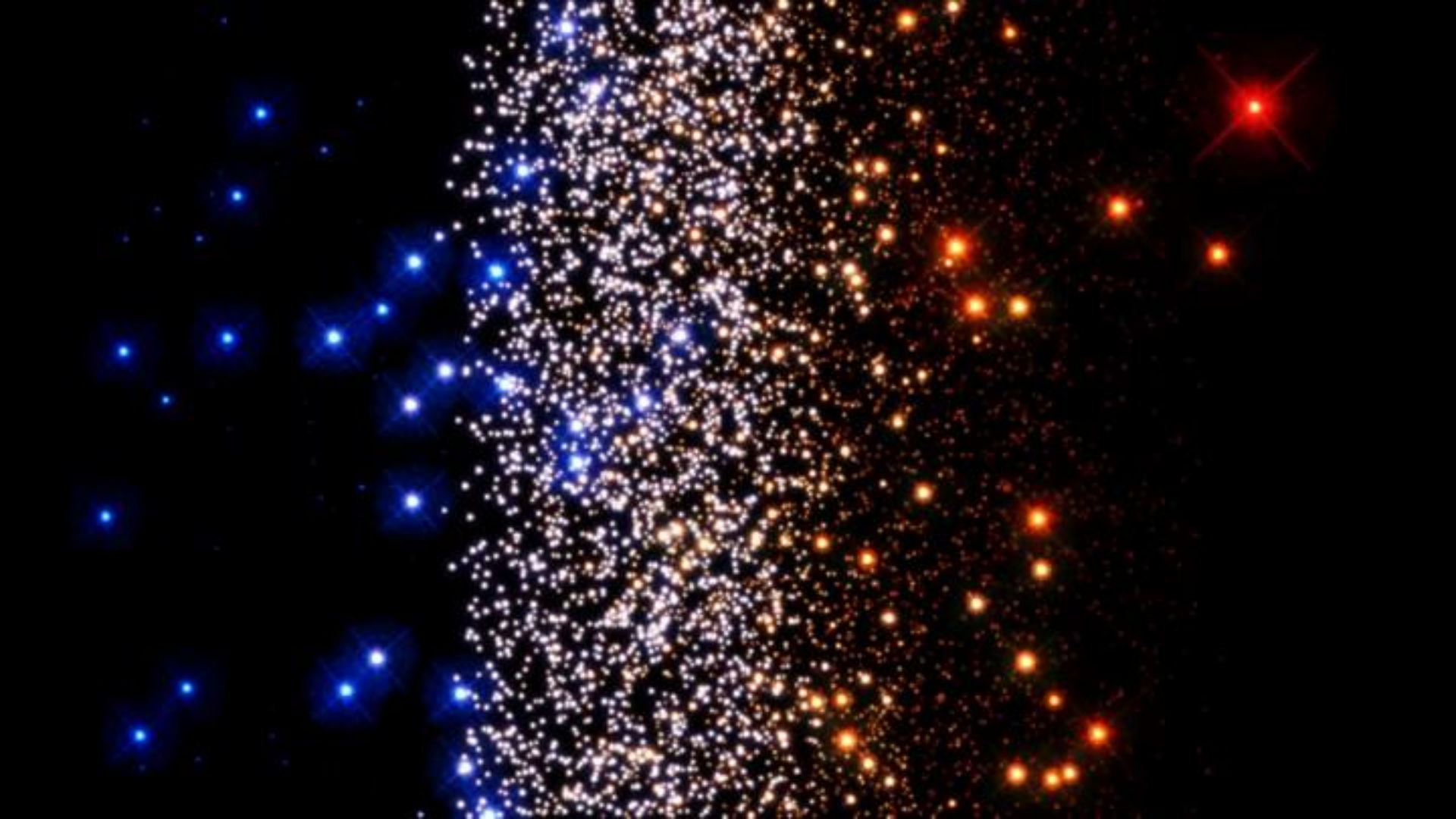
They like to sort the stars by color,
putting the **blue** stars on the left and
the **red** stars on the right.



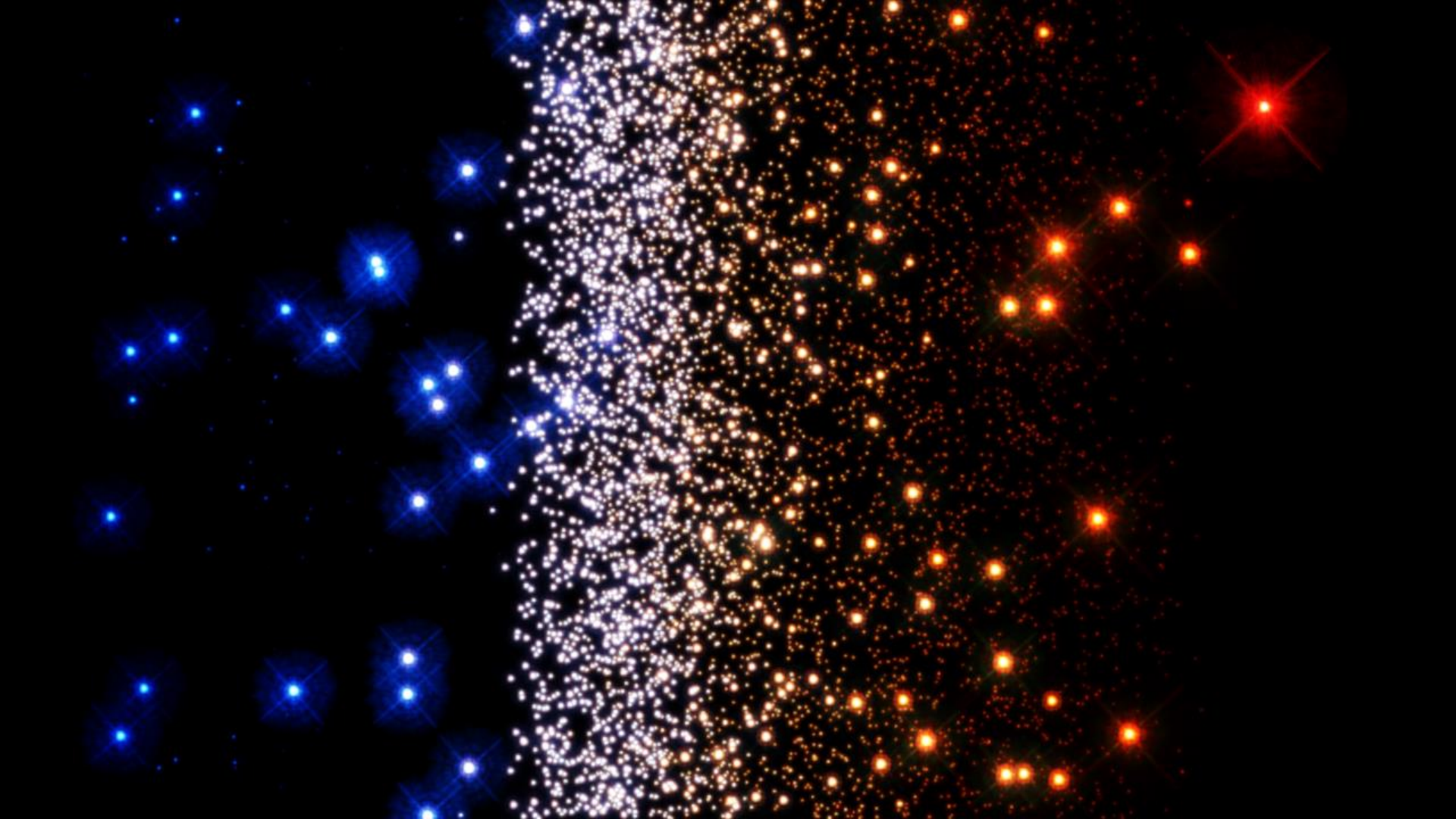
They like to sort the stars by color,
putting the **blue** stars on the left and
the **red** stars on the right.



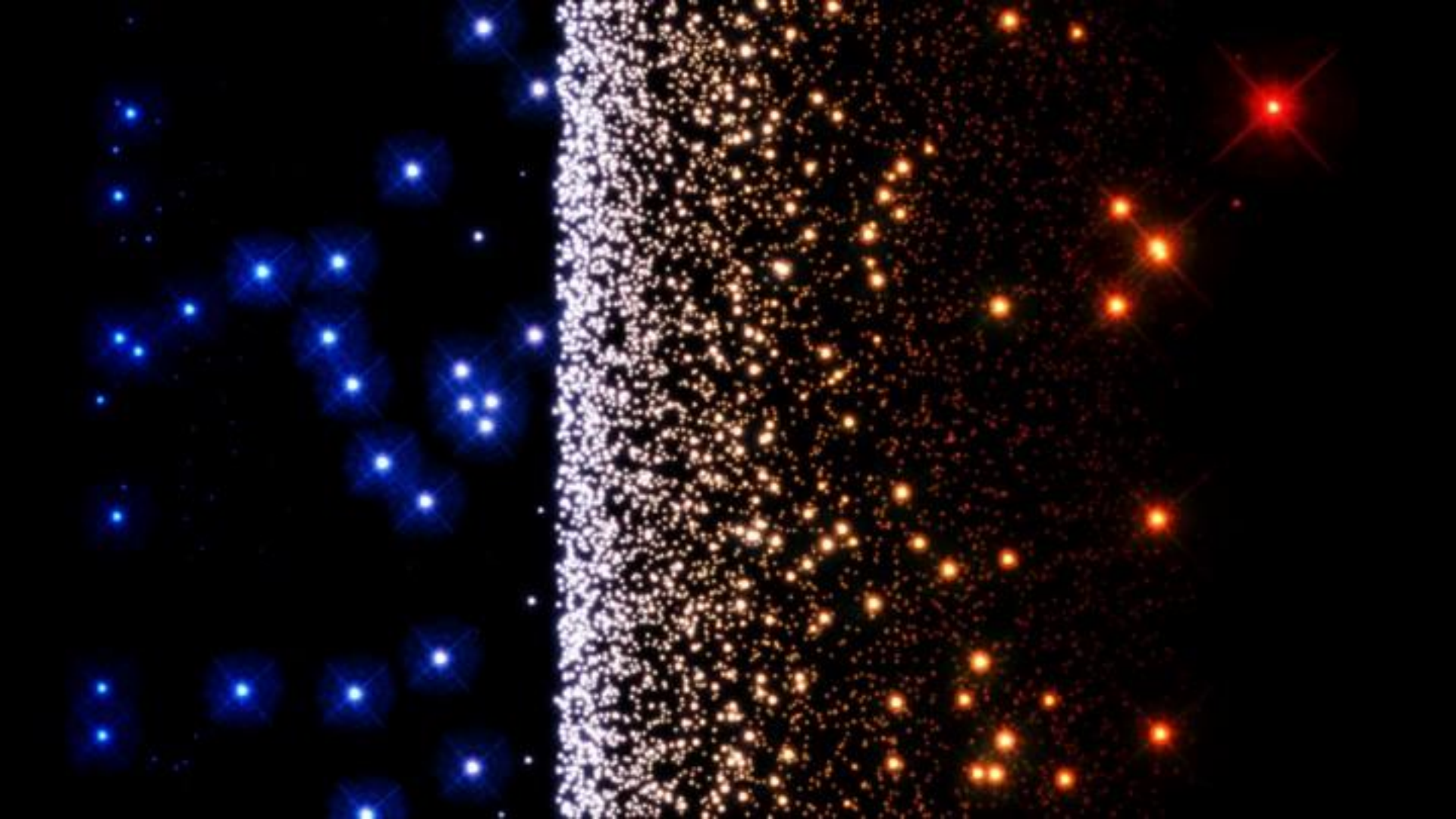
They like to sort the stars by color,
putting the **blue** stars on the left and
the **red** stars on the right.



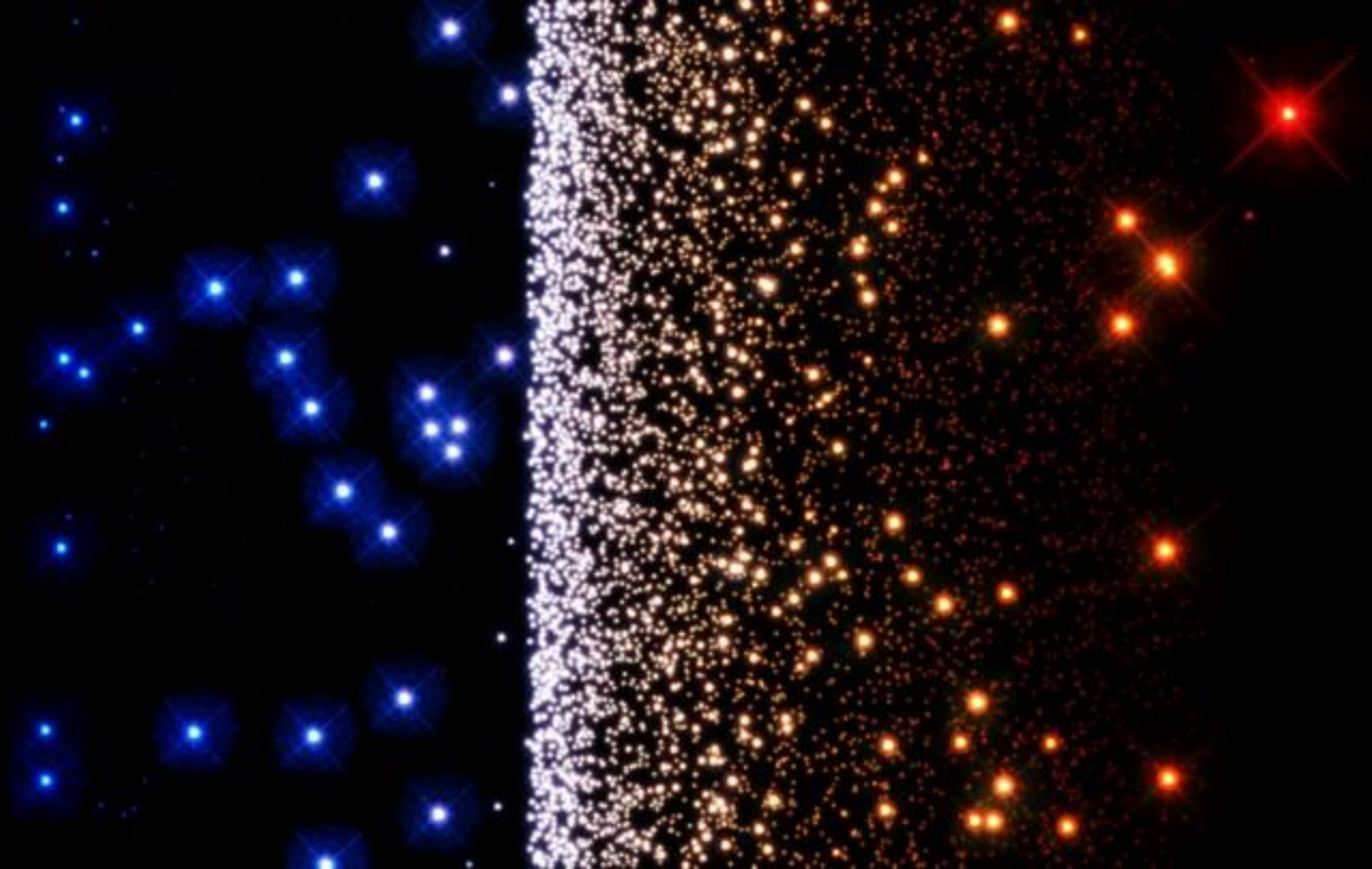
They like to sort the stars by color,
putting the **blue** stars on the left and
the **red** stars on the right.



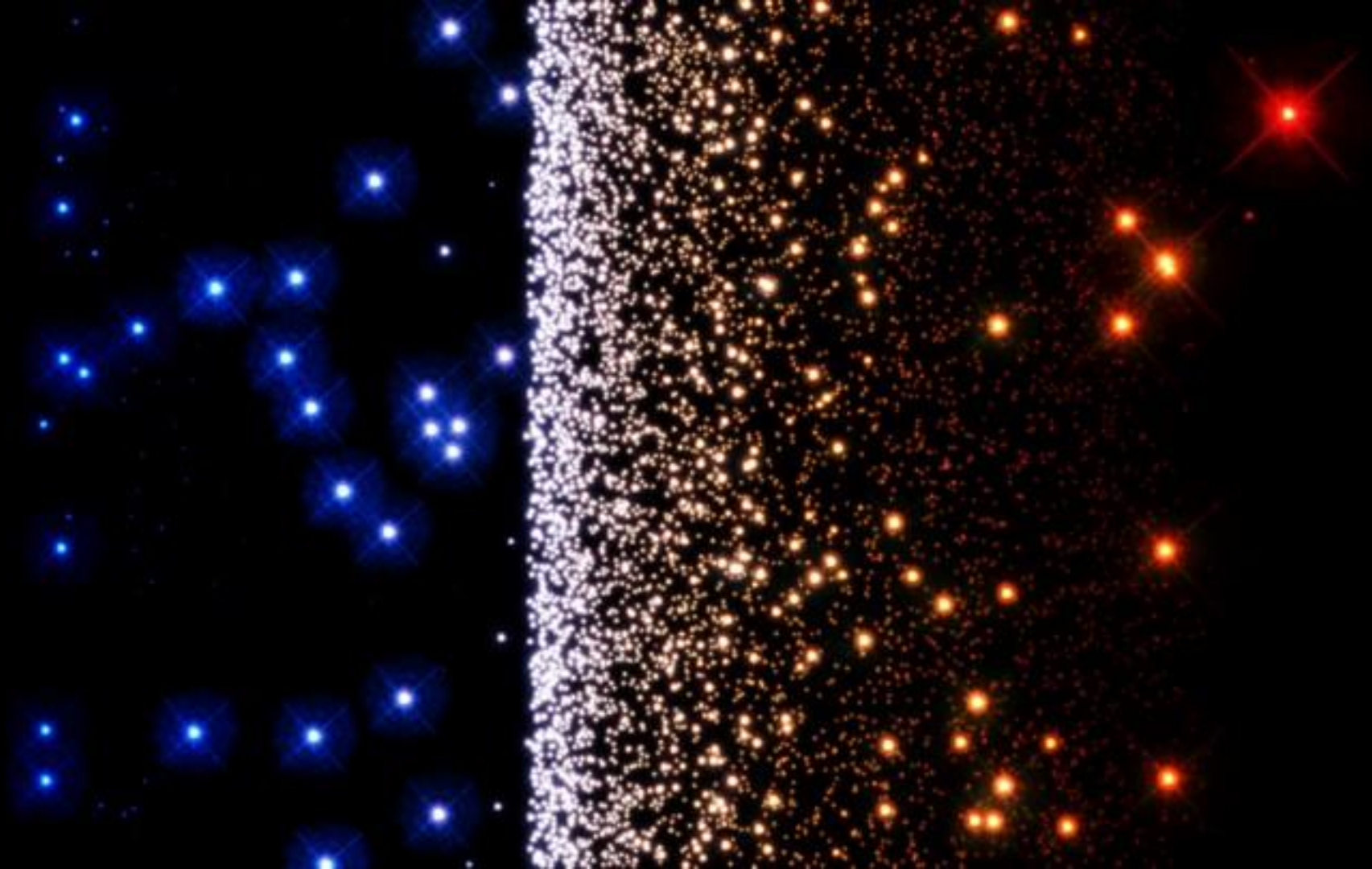
They like to sort the stars by color,
putting the **blue** stars on the left and
the **red** stars on the right.



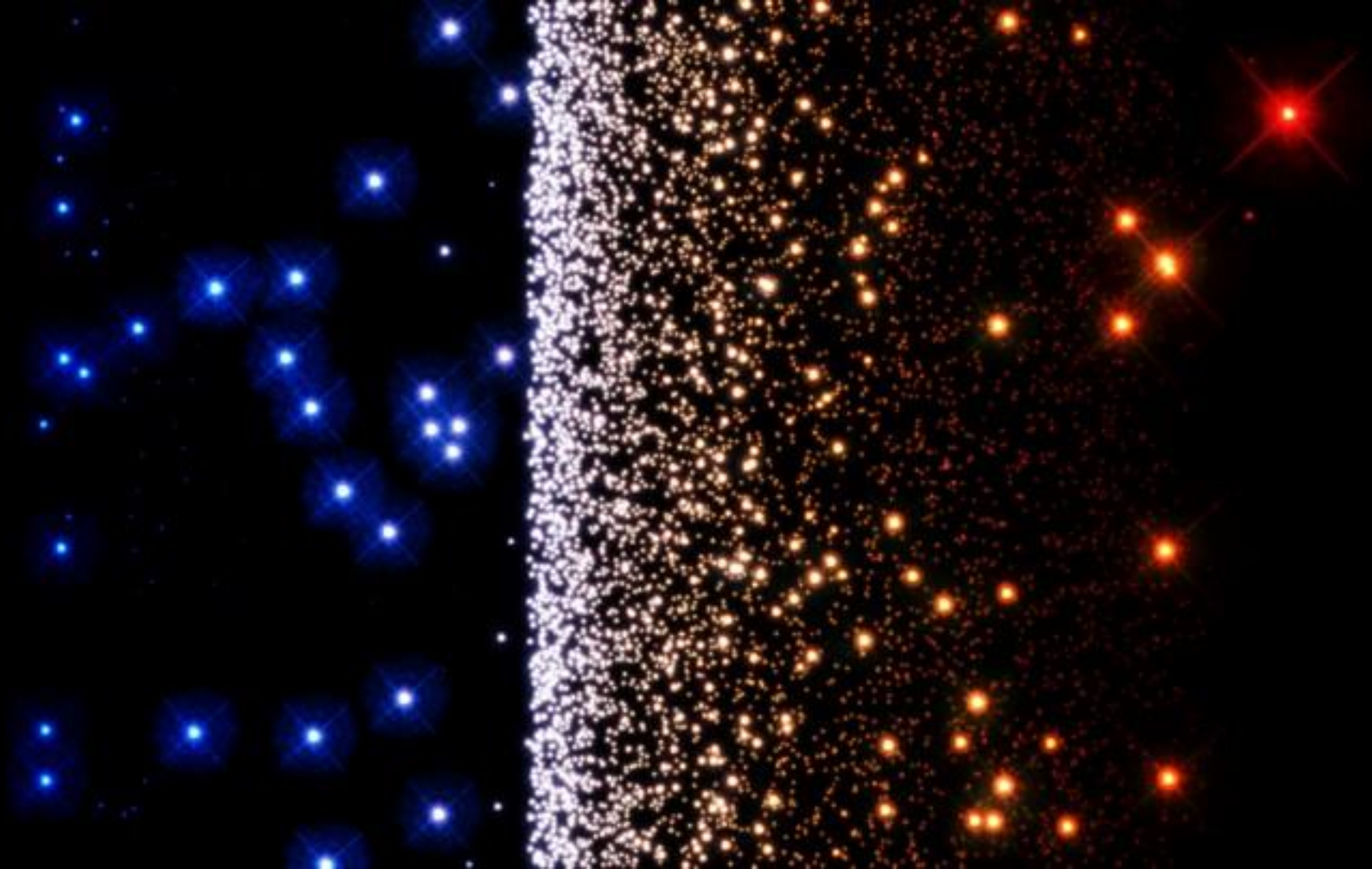
They like to sort the stars by color,
putting the **blue** stars on the left and
the **red** stars on the right.



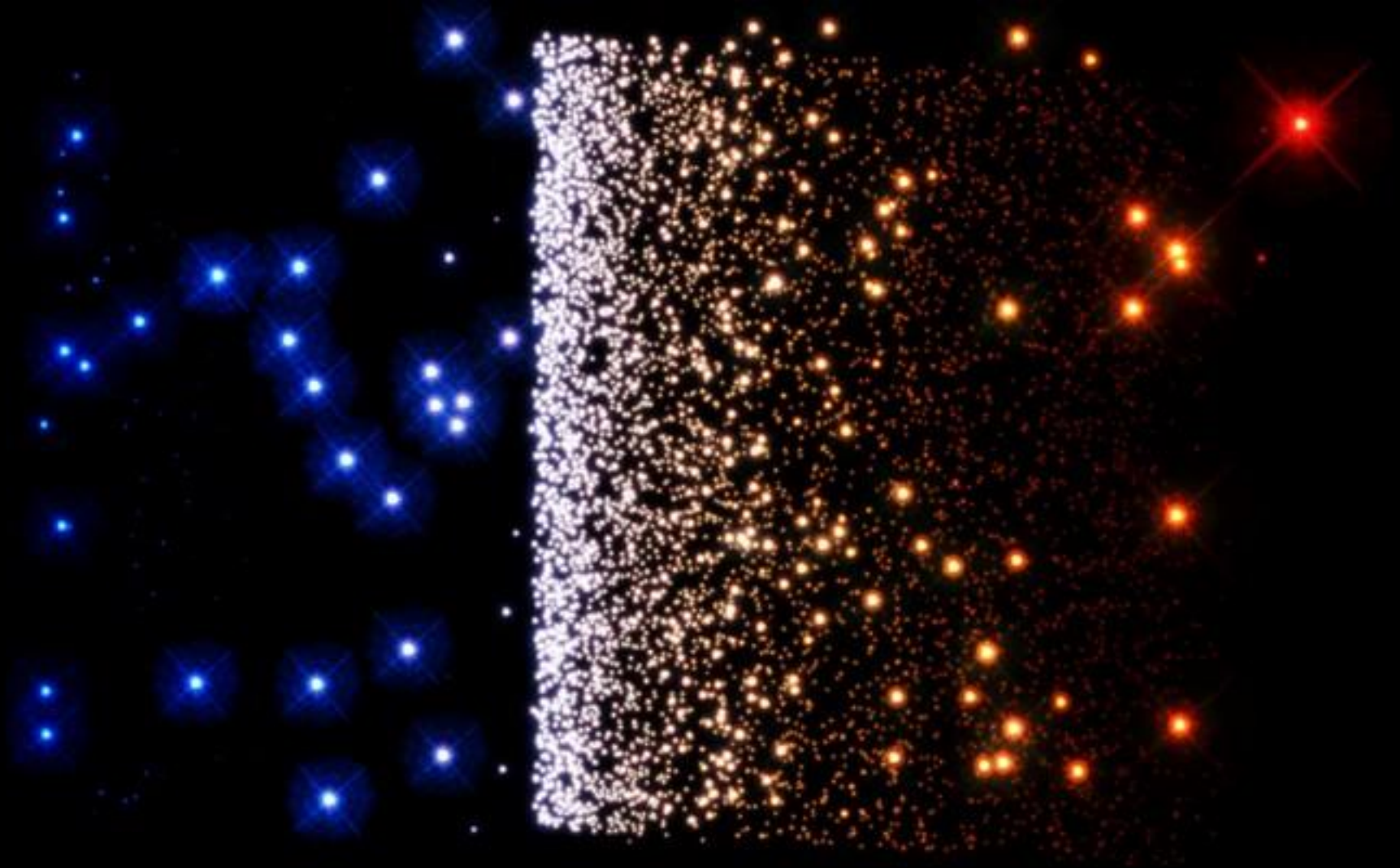
Note that there are very few extreme stars;
most stars are **white**, meaning they have a
balanced spectrum.



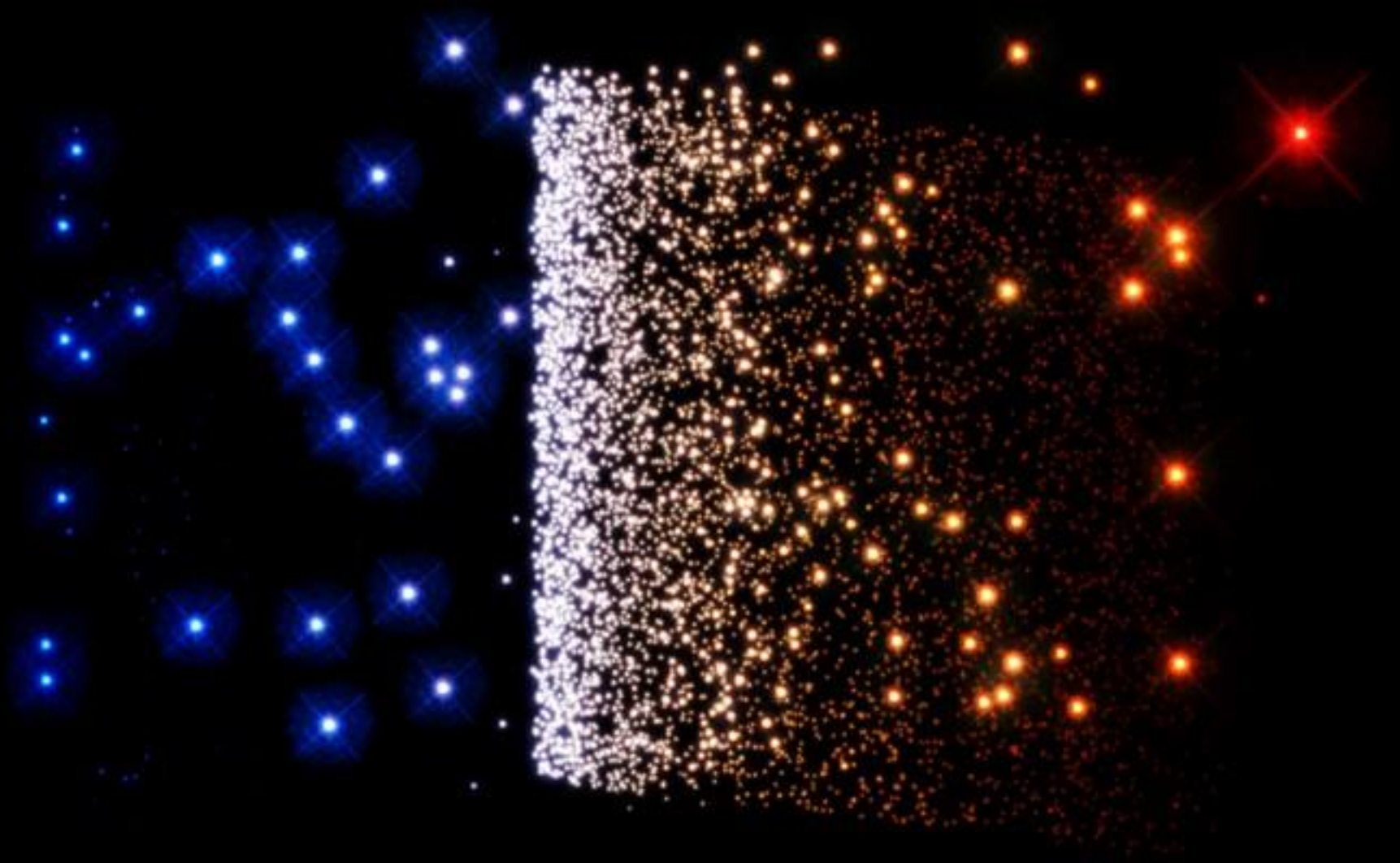
Astronomers also like to characterize the stars in terms of brightness.



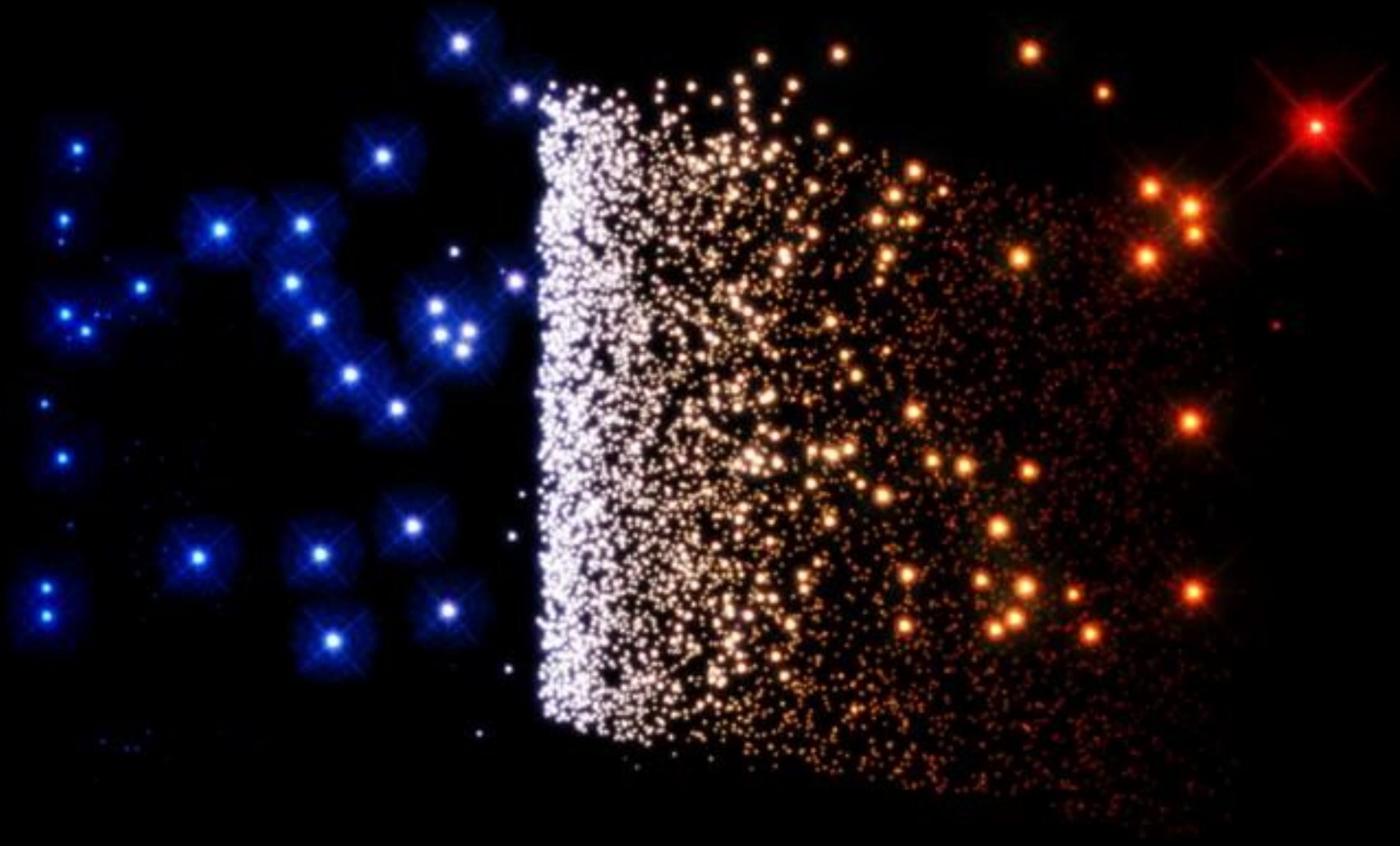
They like to sort the stars,
putting the **bright** stars on top,
and the **faint** stars on the bottom.



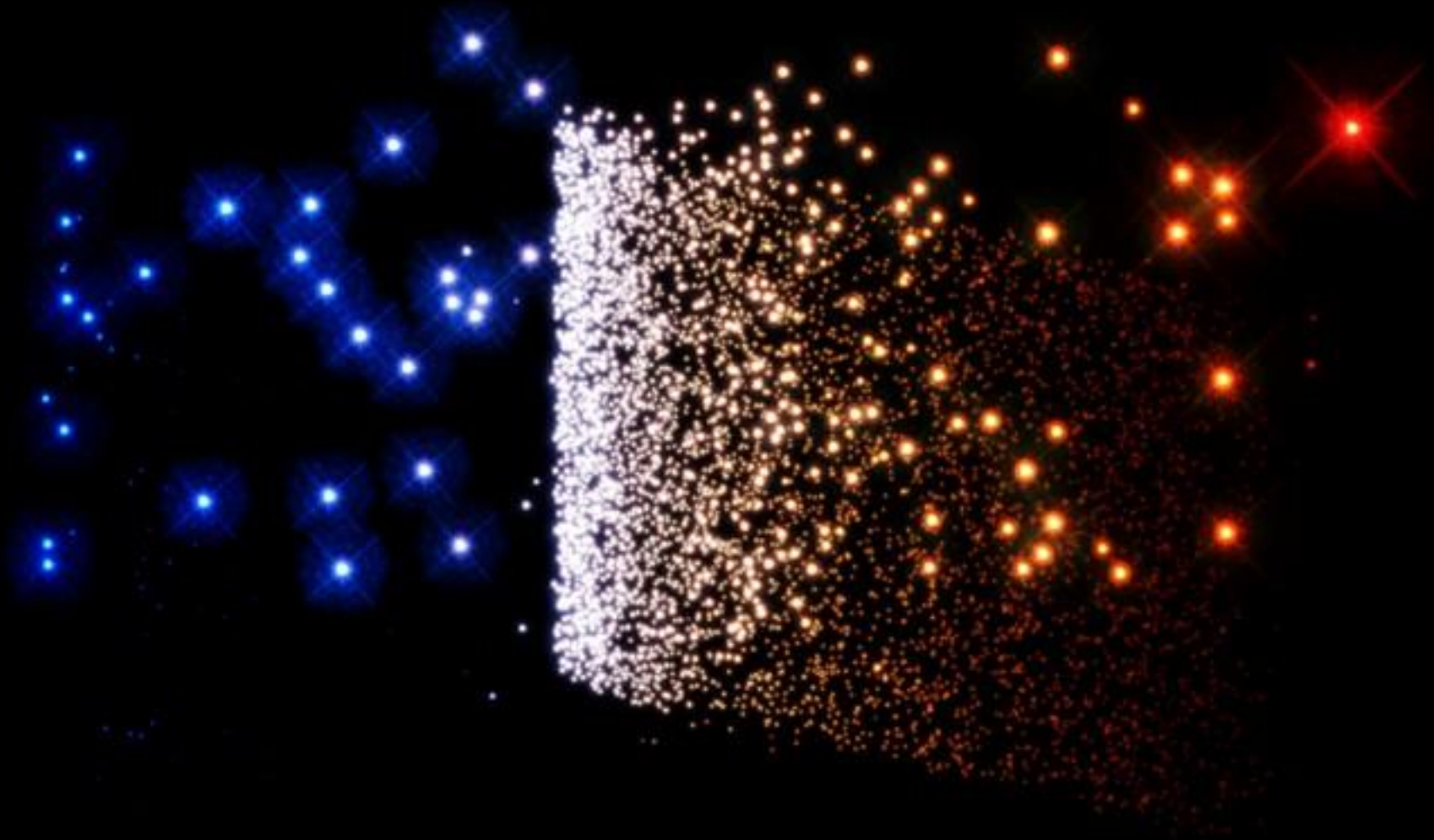
They like to sort the stars,
putting the **bright** stars on top,
and the **faint** stars on the bottom.



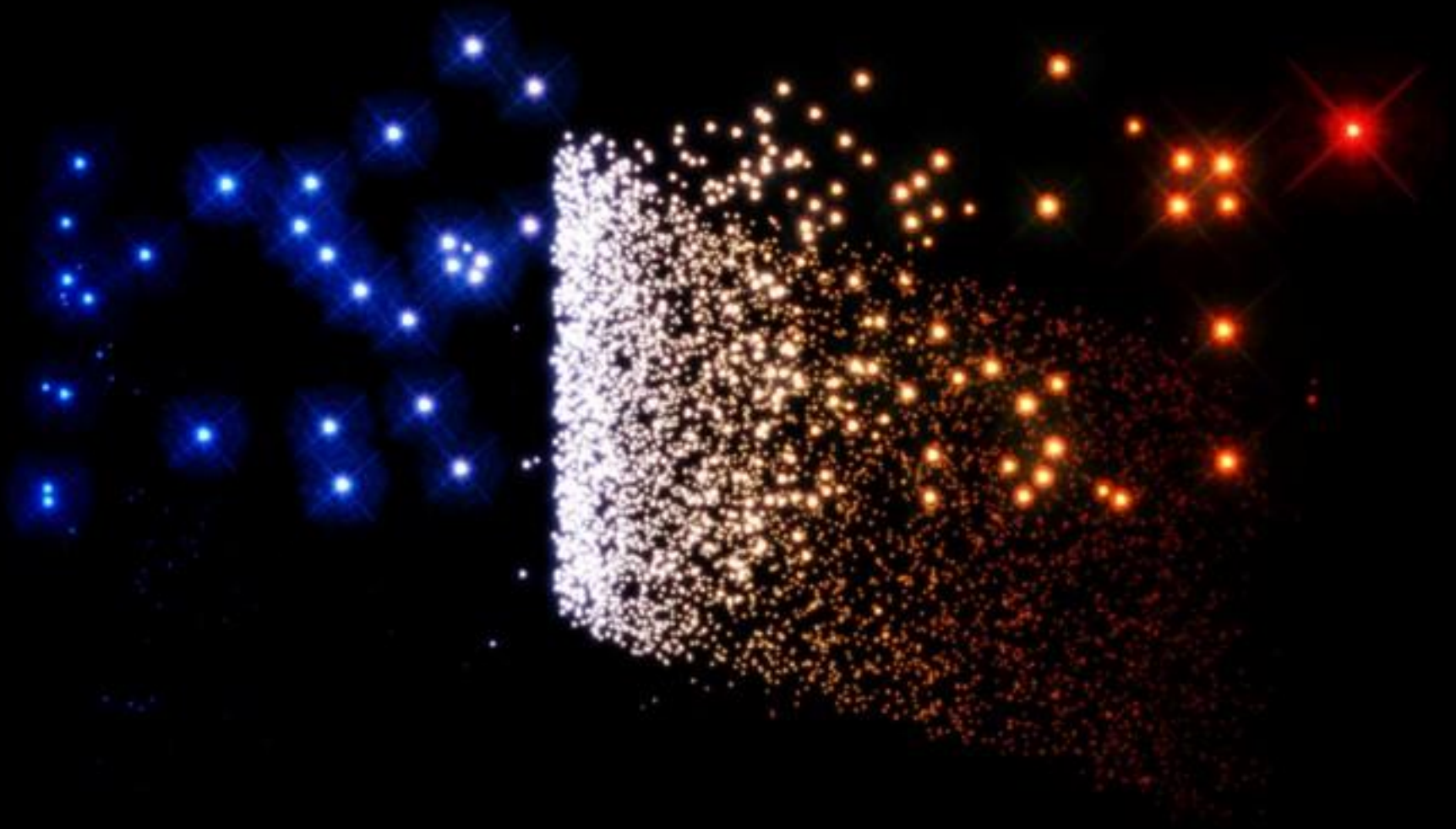
They like to sort the stars,
putting the **bright** stars on top,
and the **faint** stars on the bottom.



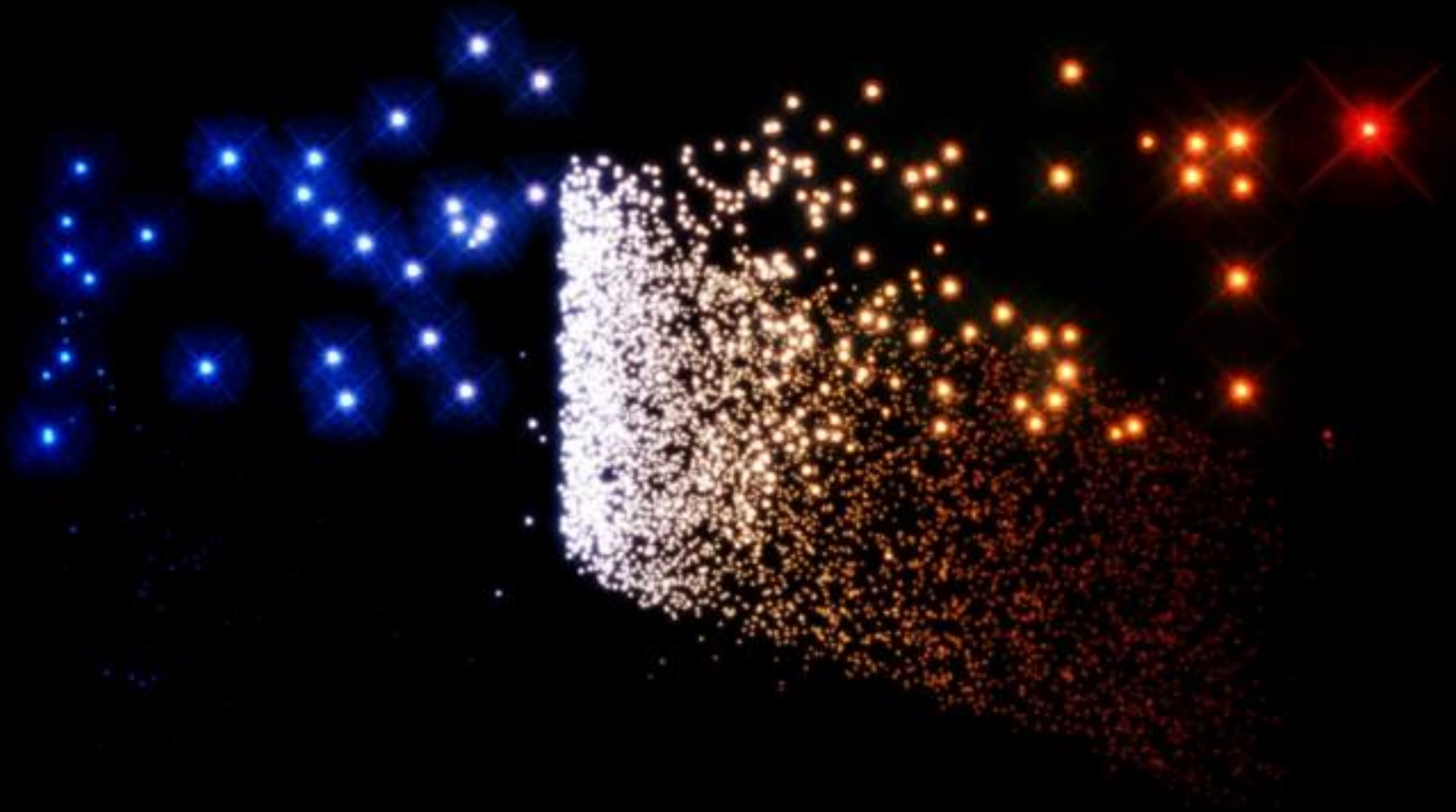
They like to sort the stars,
putting the **bright** stars on top,
and the **faint** stars on the bottom.



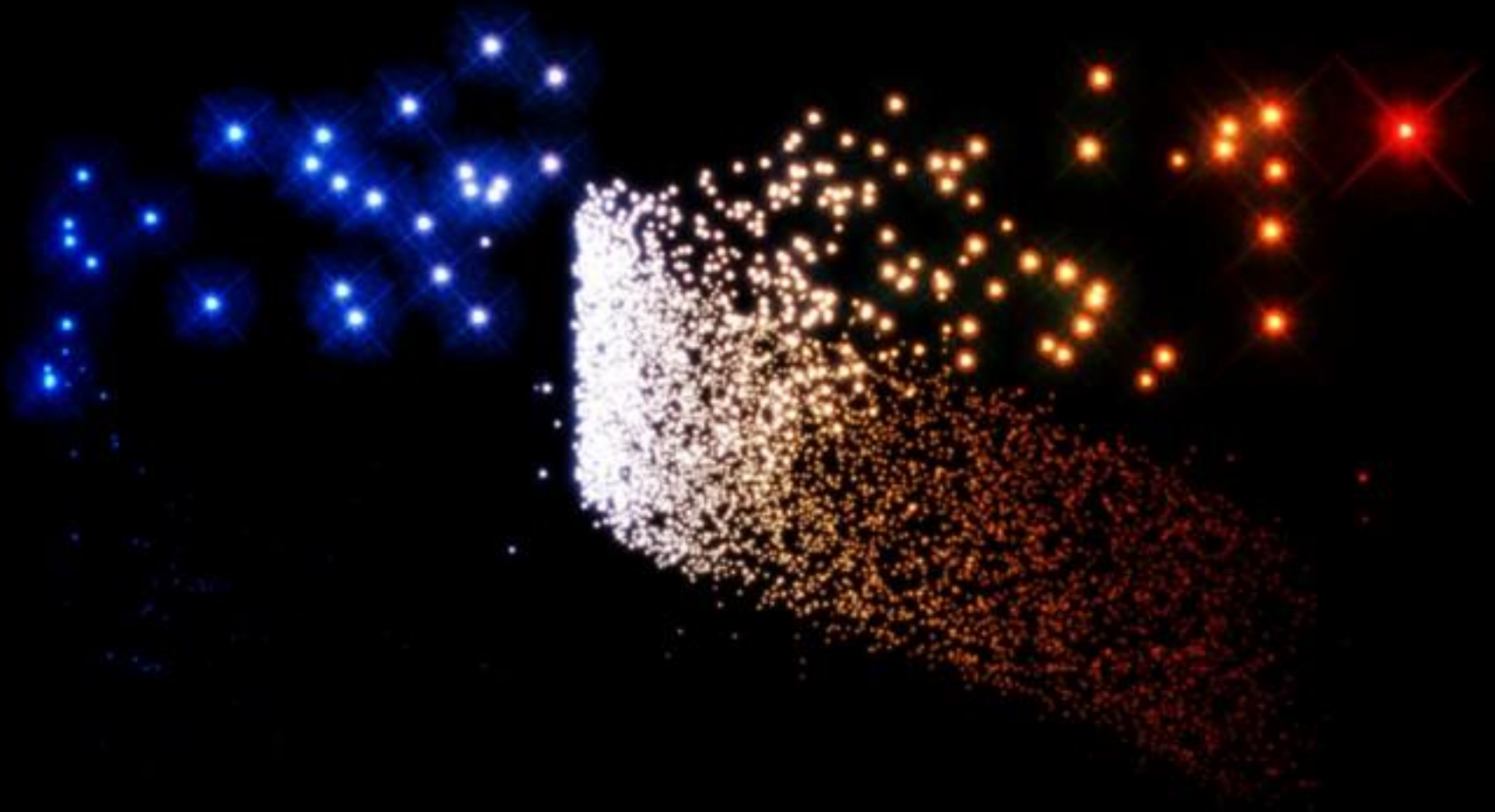
They like to sort the stars,
putting the **bright** stars on top,
and the **faint** stars on the bottom.



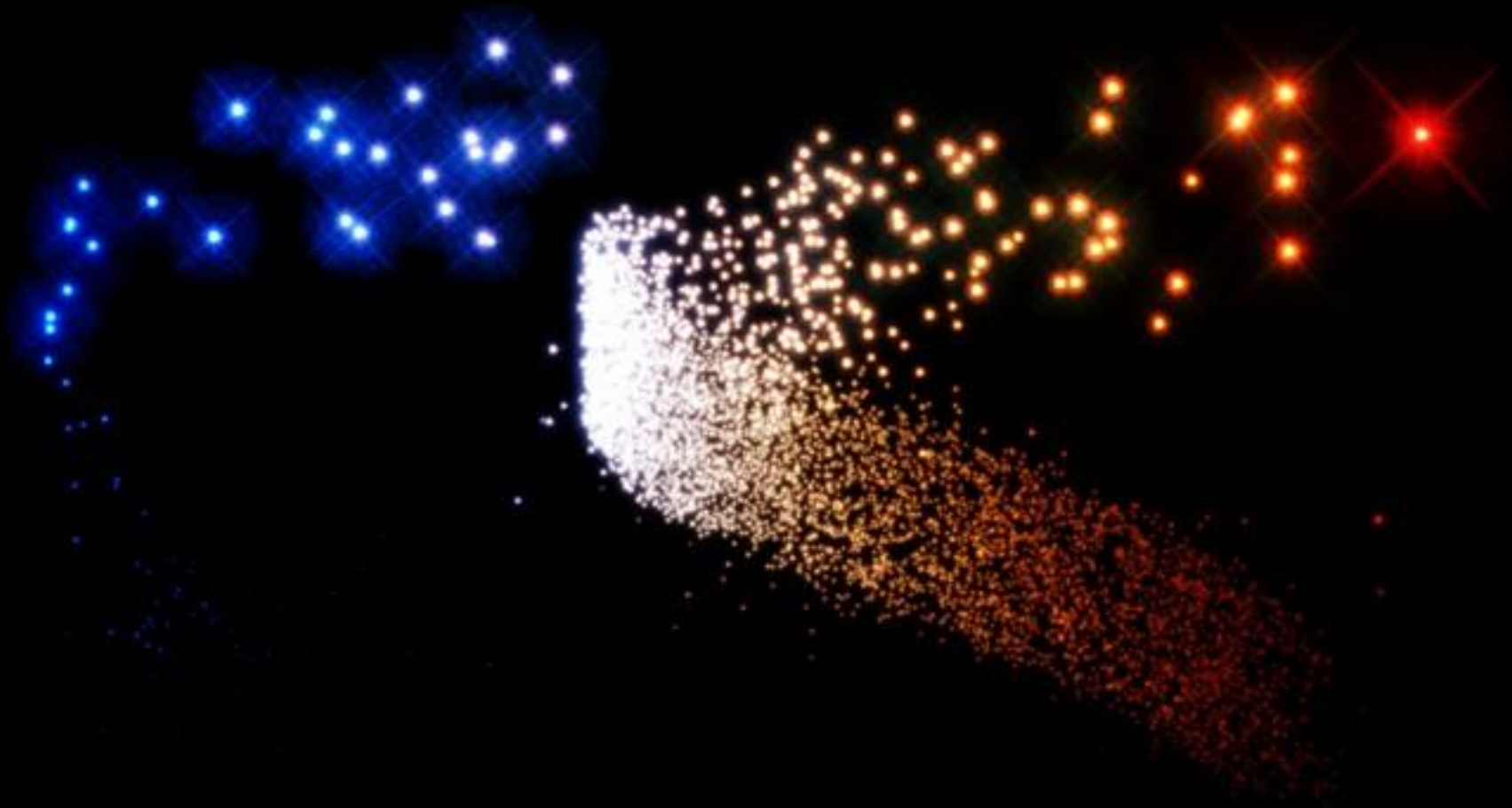
They like to sort the stars,
putting the **bright** stars on top,
and the **faint** stars on the bottom.



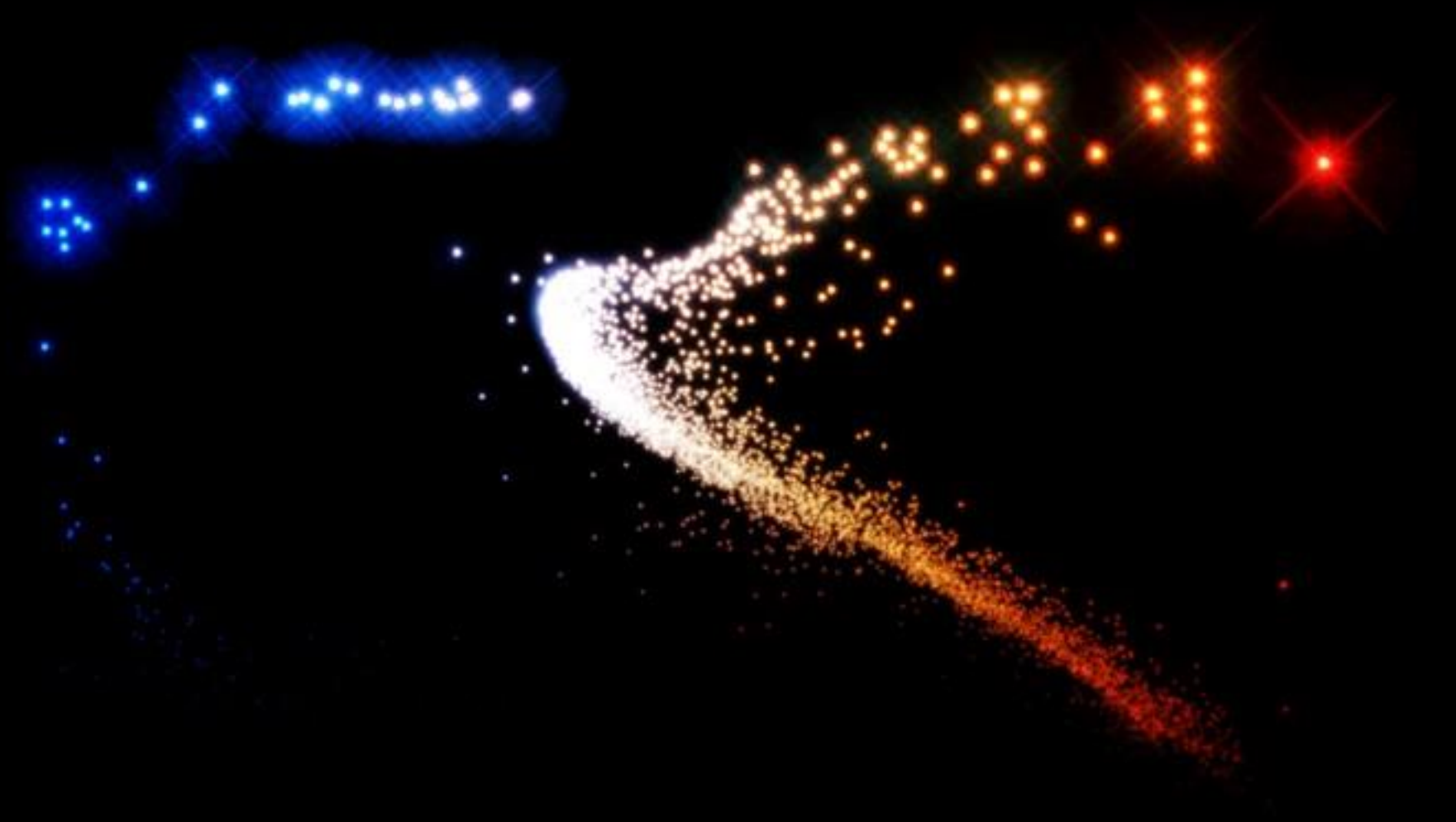
They like to sort the stars,
putting the **bright** stars on top,
and the **faint** stars on the bottom.



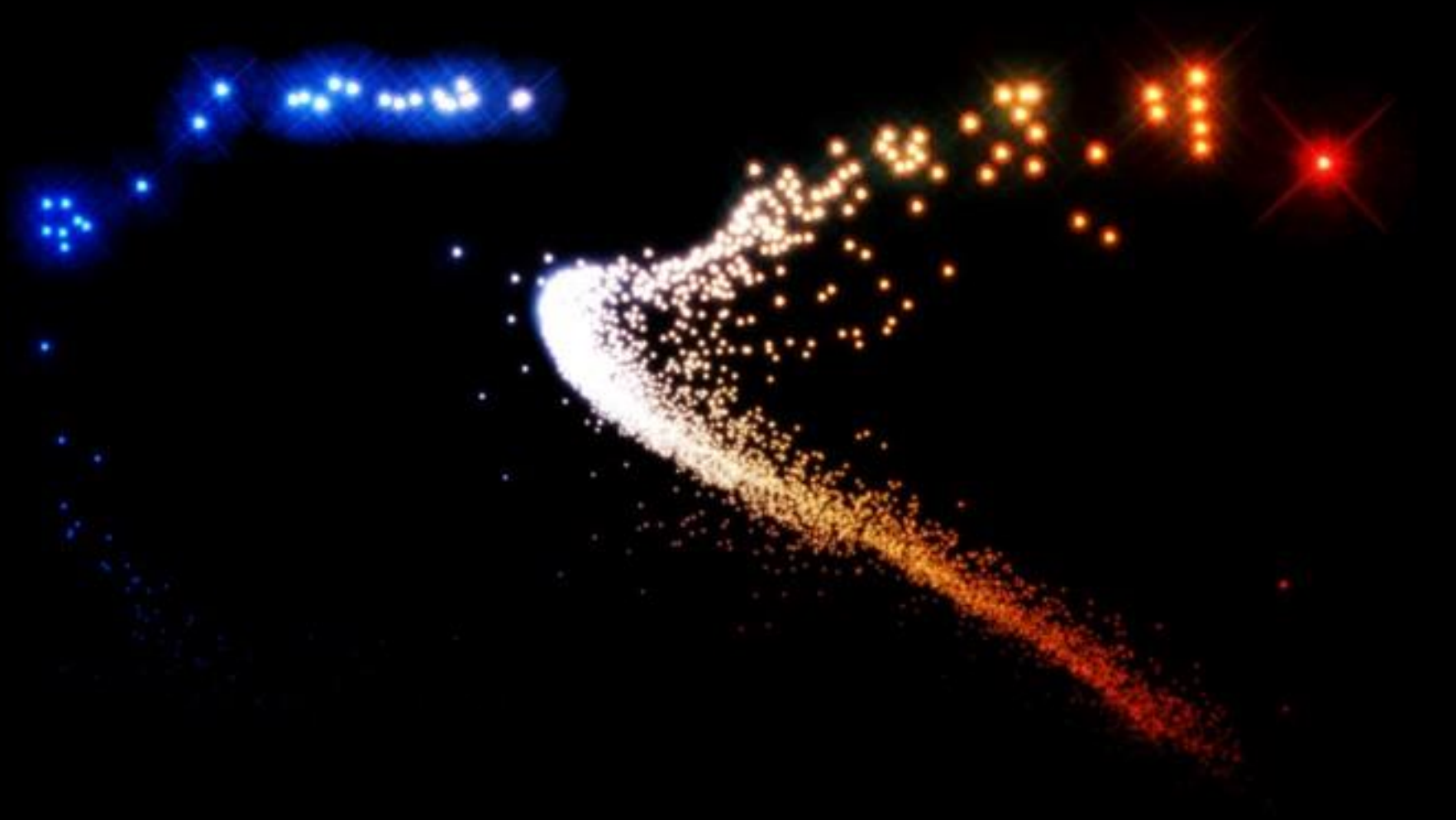
They like to sort the stars,
putting the **bright** stars on top,
and the **faint** stars on the bottom.



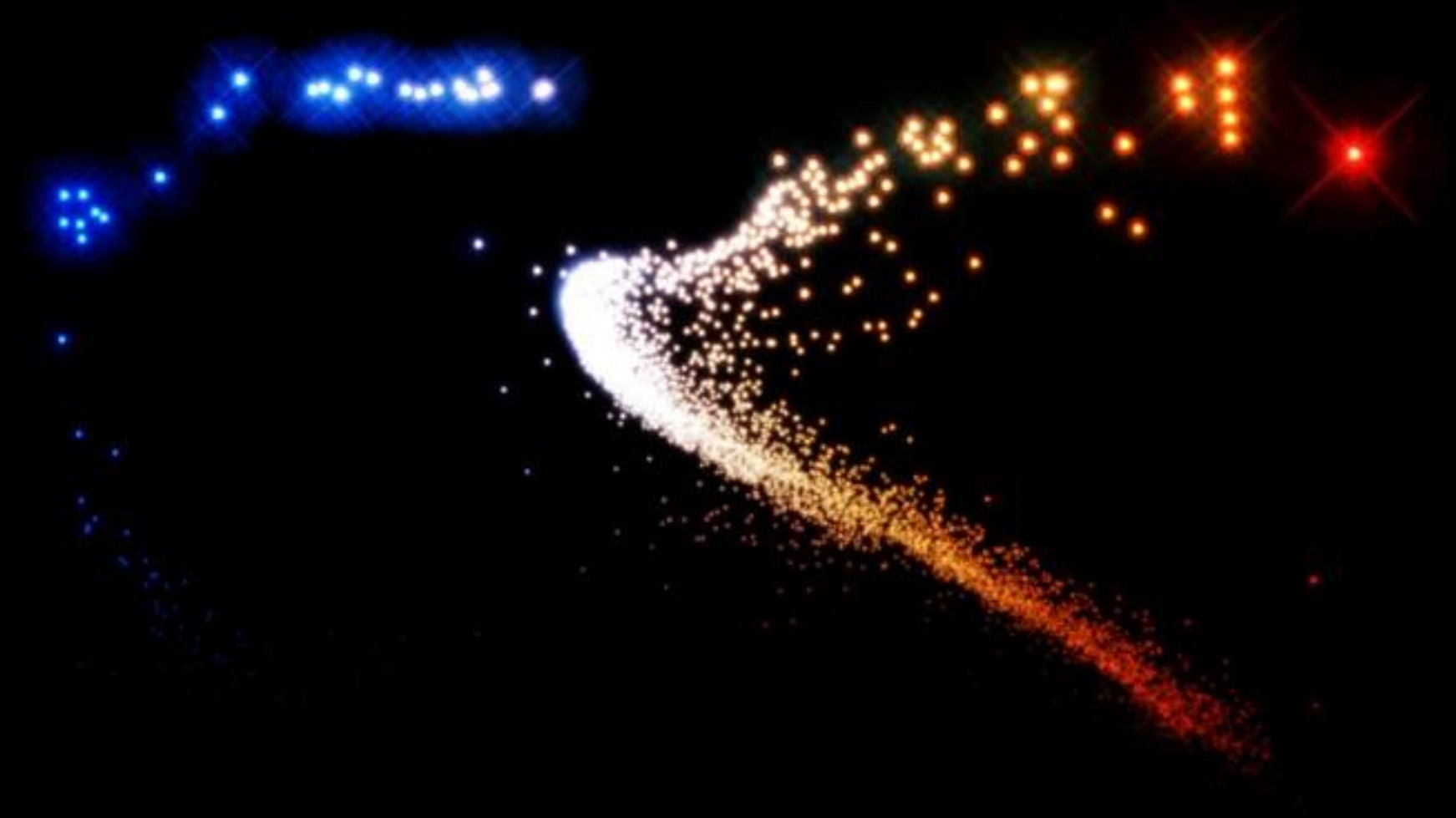
They like to sort the stars,
putting the **bright** stars on top,
and the **faint** stars on the bottom.



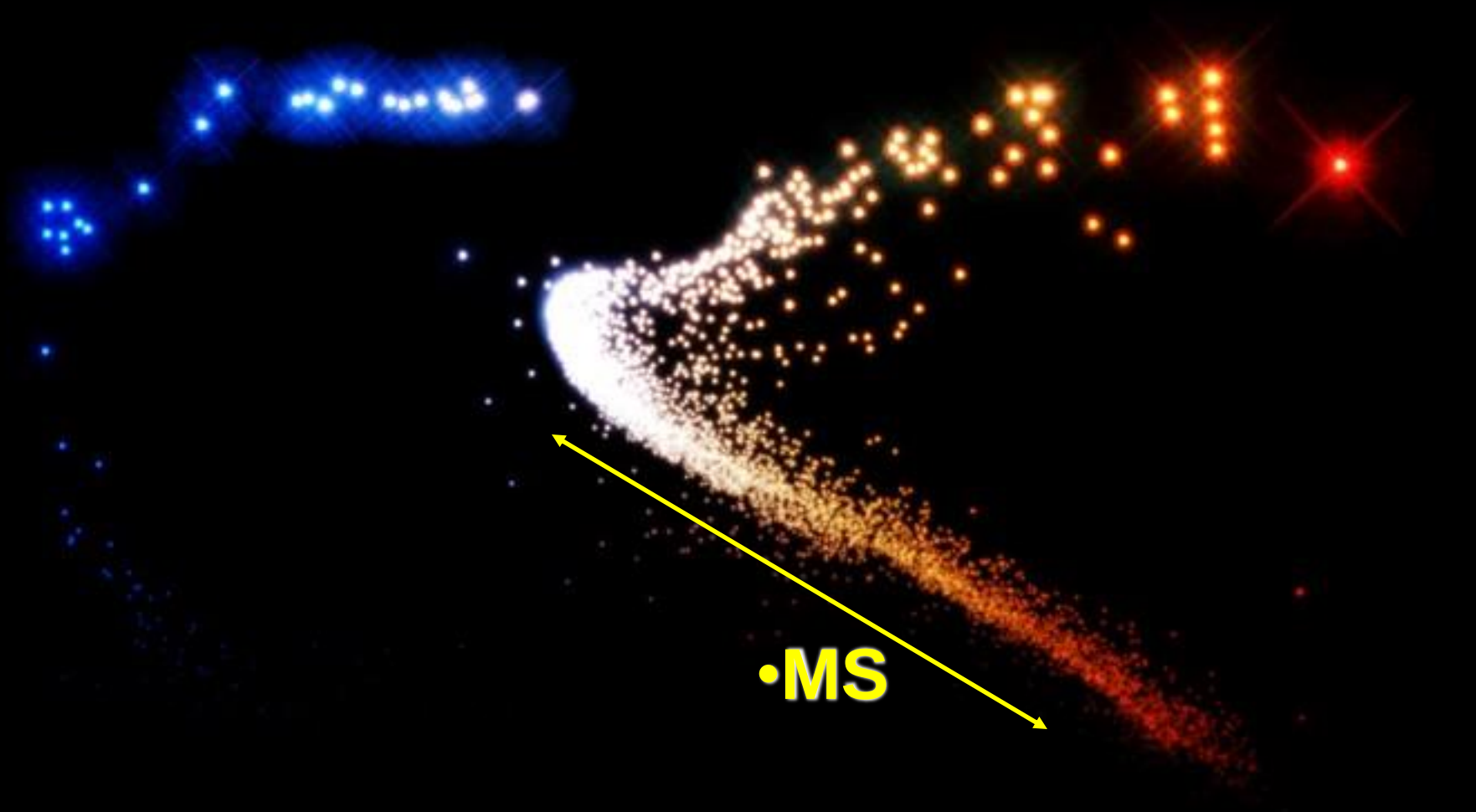
They like to sort the stars,
putting the **bright** stars on top,
and the **faint** stars on the bottom.



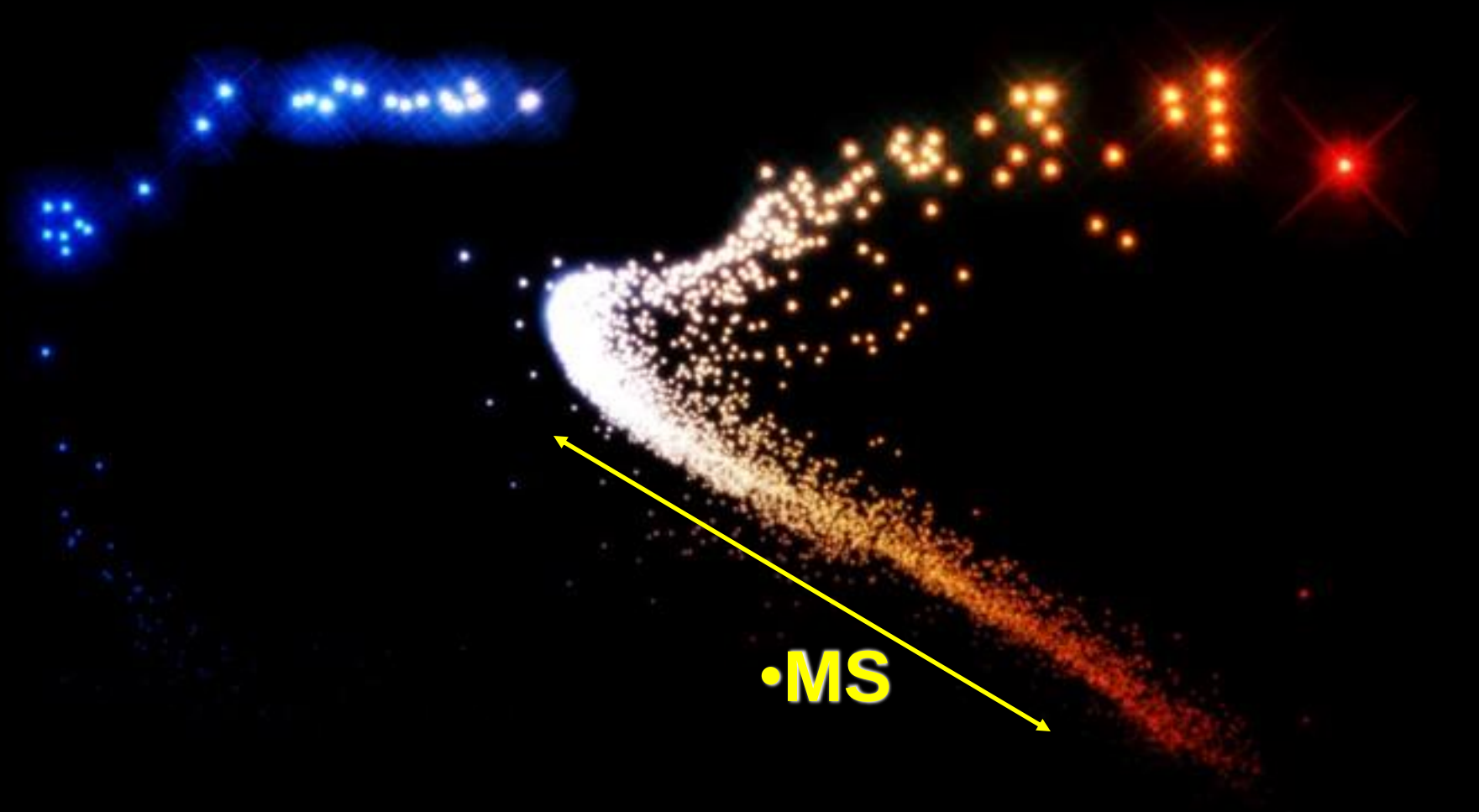
This is called a
Color-Magnitude Diagram
(CMD).



Stars tend to lie along a few well-defined sequences.



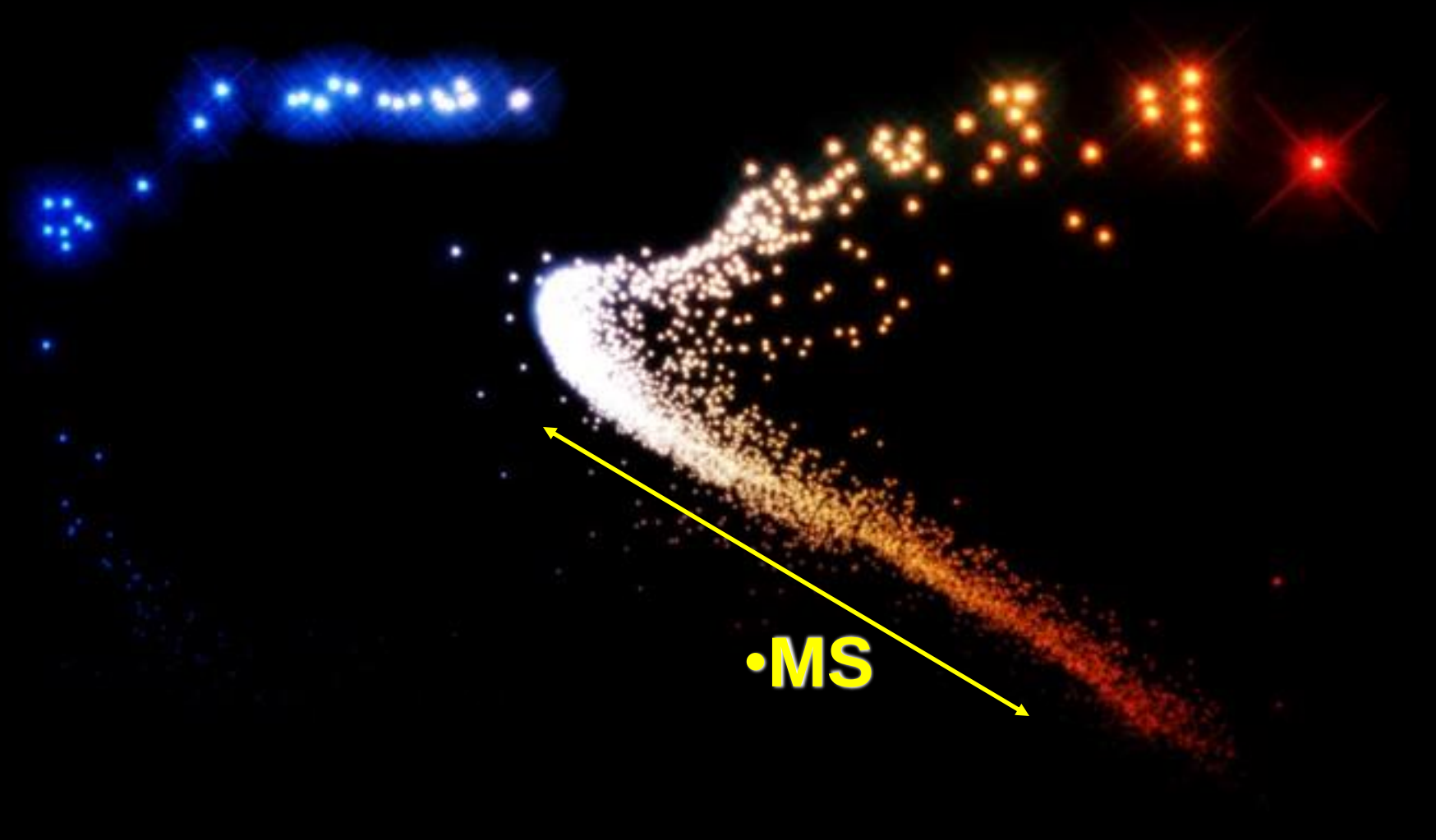
The vast majority of stars lie along the
Main Sequence (MS).



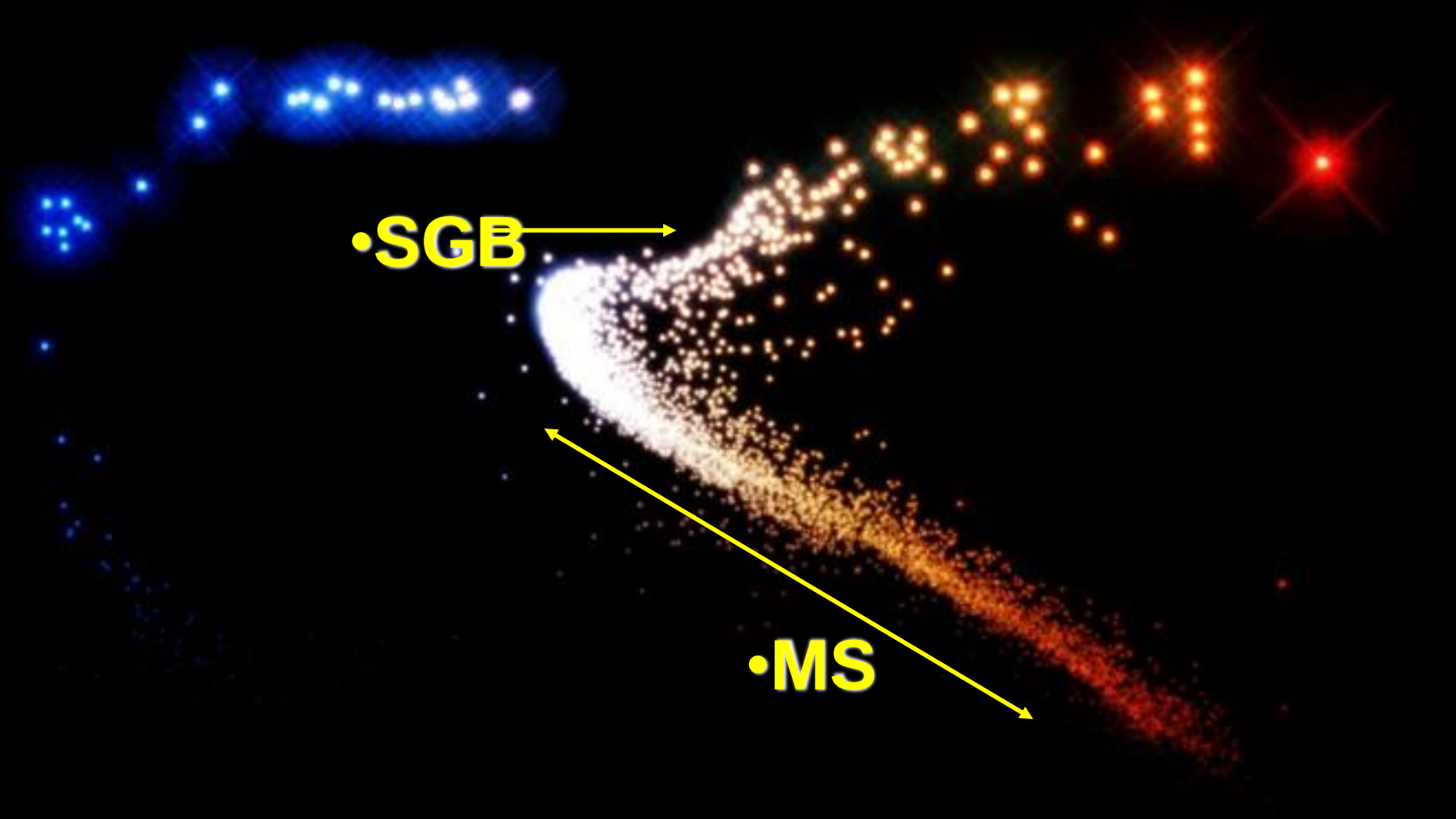
Stars don't move along this sequence; rather they sit at the same place for a long time fusing their hydrogen into helium.



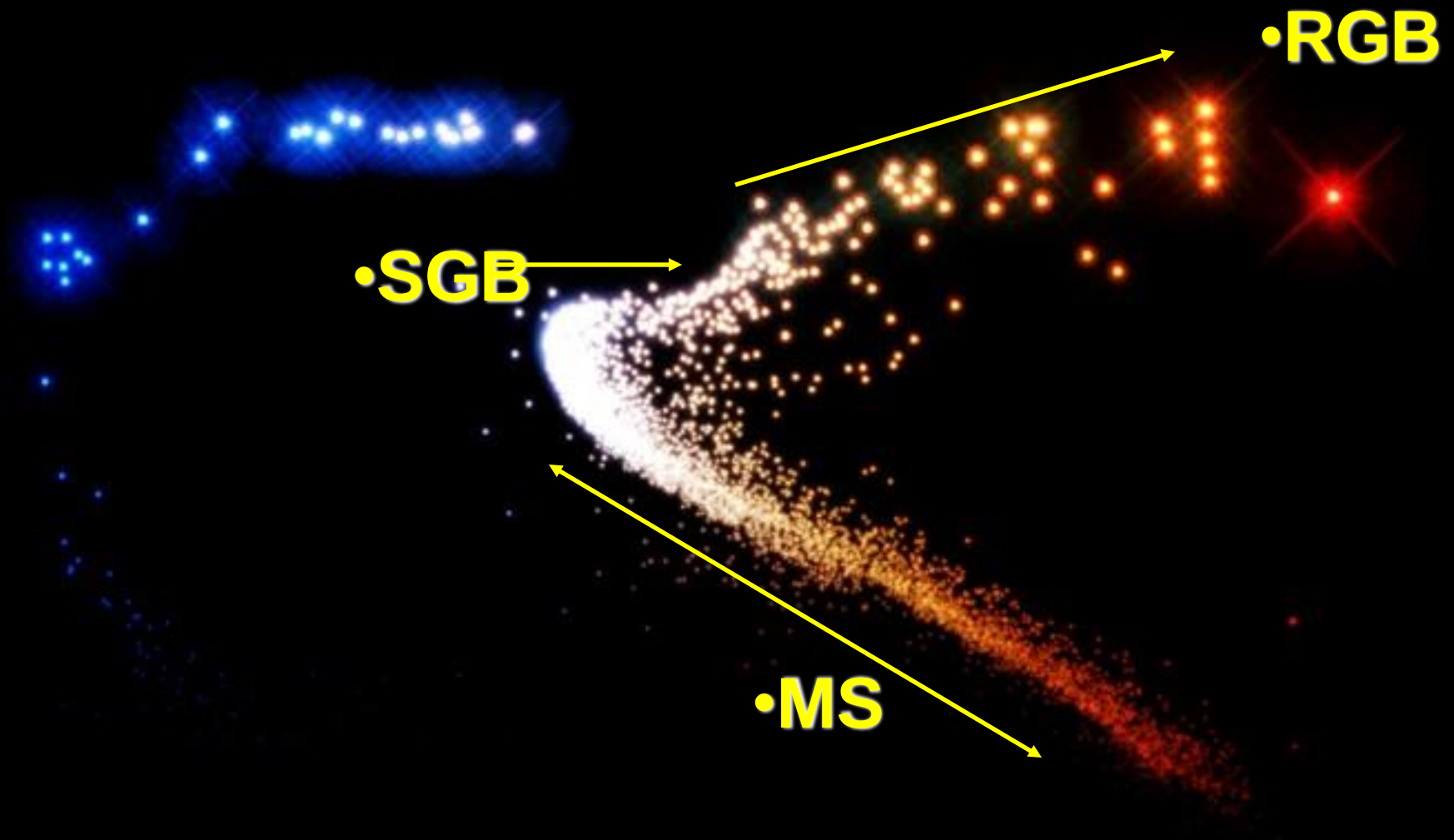
This is a sequence in mass. Stars at the bright end are massive, and those at the faint, red end have very low masses.



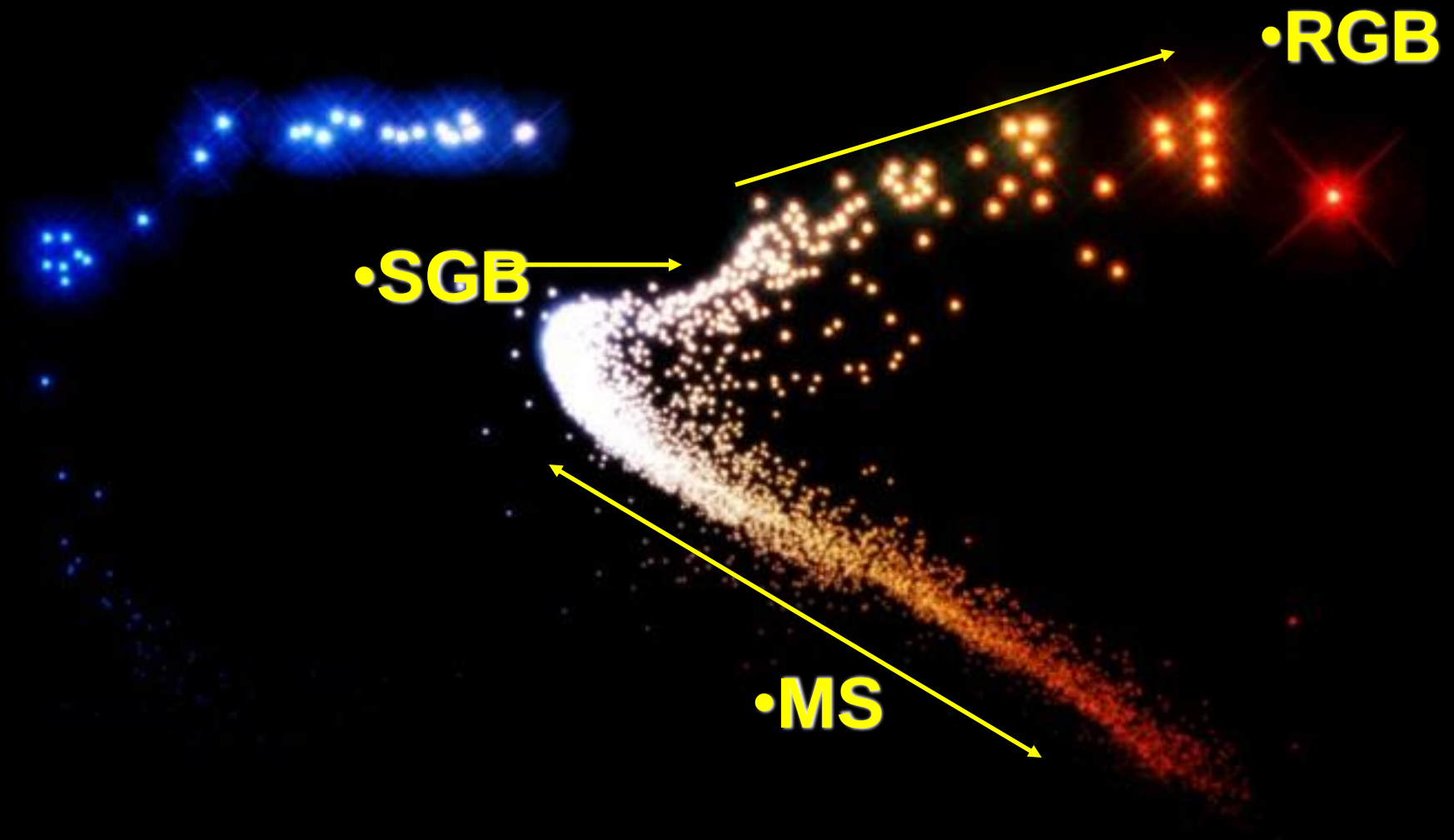
The **more massive stars** consume their hydrogen fuel much **faster** than the lower-mass stars.



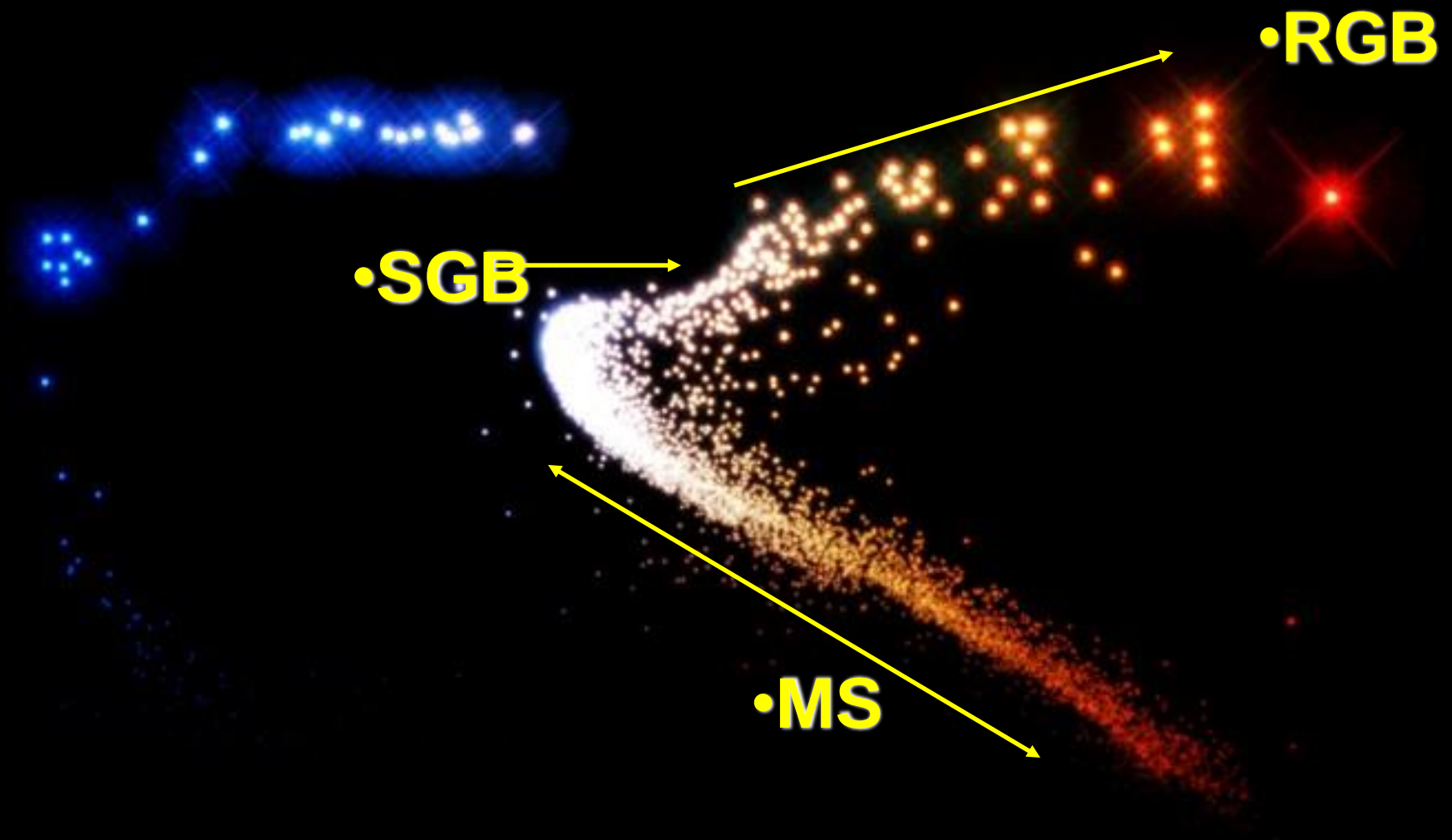
When fuel becomes sparse in the stellar core, stars re-adjust their internal structure and move red-ward along the **Sub-Giant Branch (SGB)**.



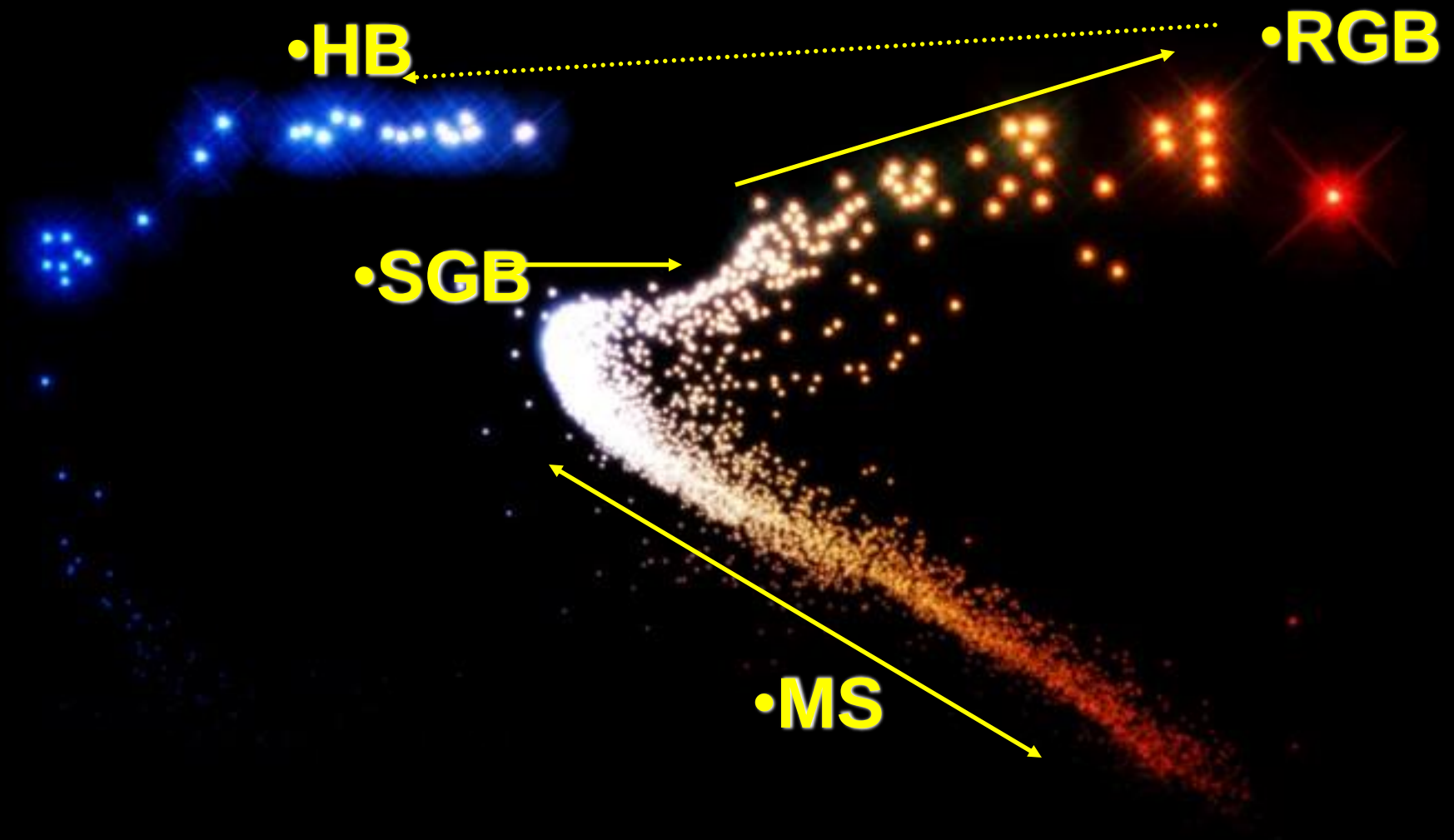
They start to burn the hydrogen in a shell around the core and become big and bloated as they move up the **Red Giant Branch (RGB)**.



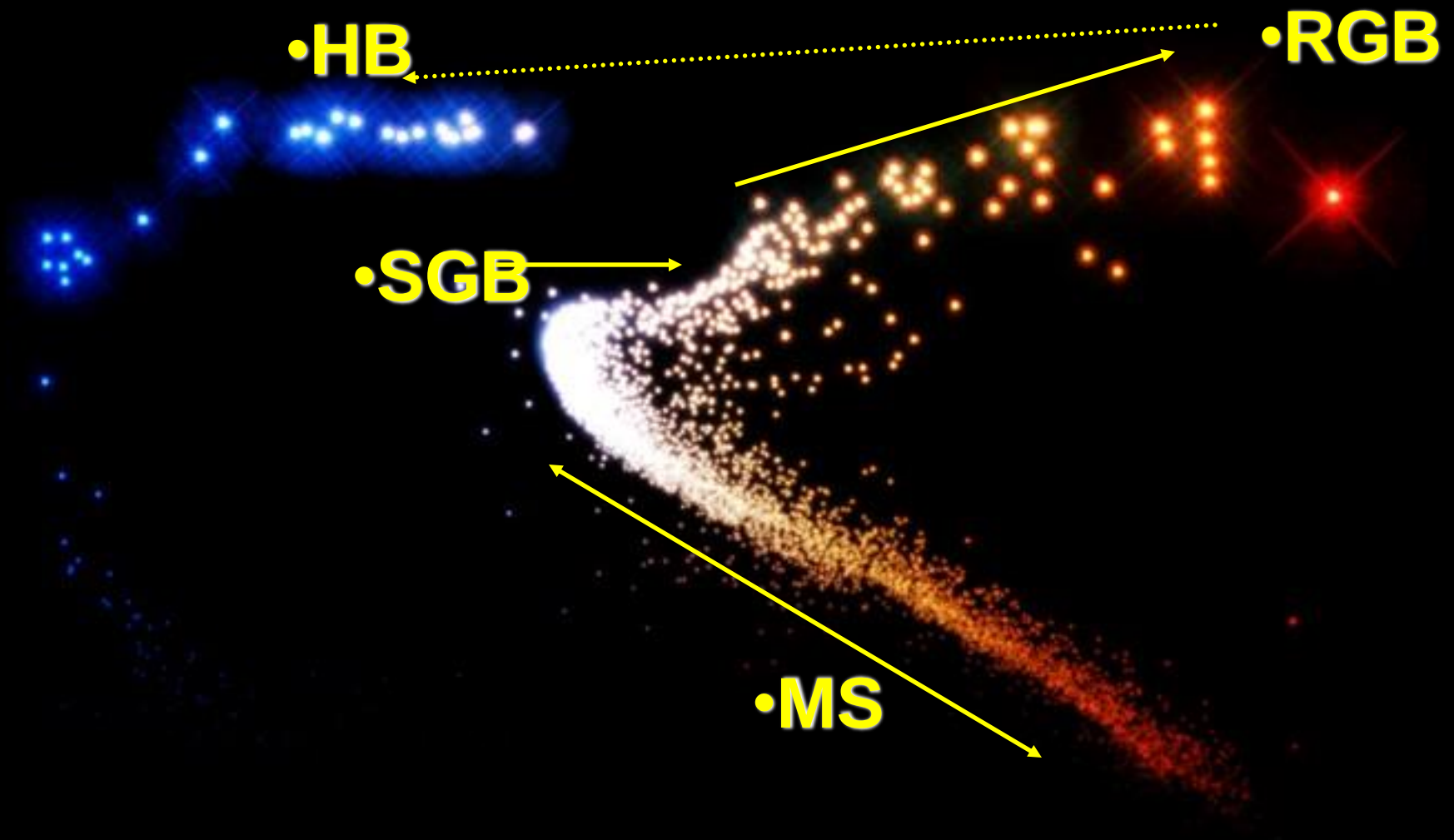
As the shell-burning continues, more and more helium gets deposited onto the core.



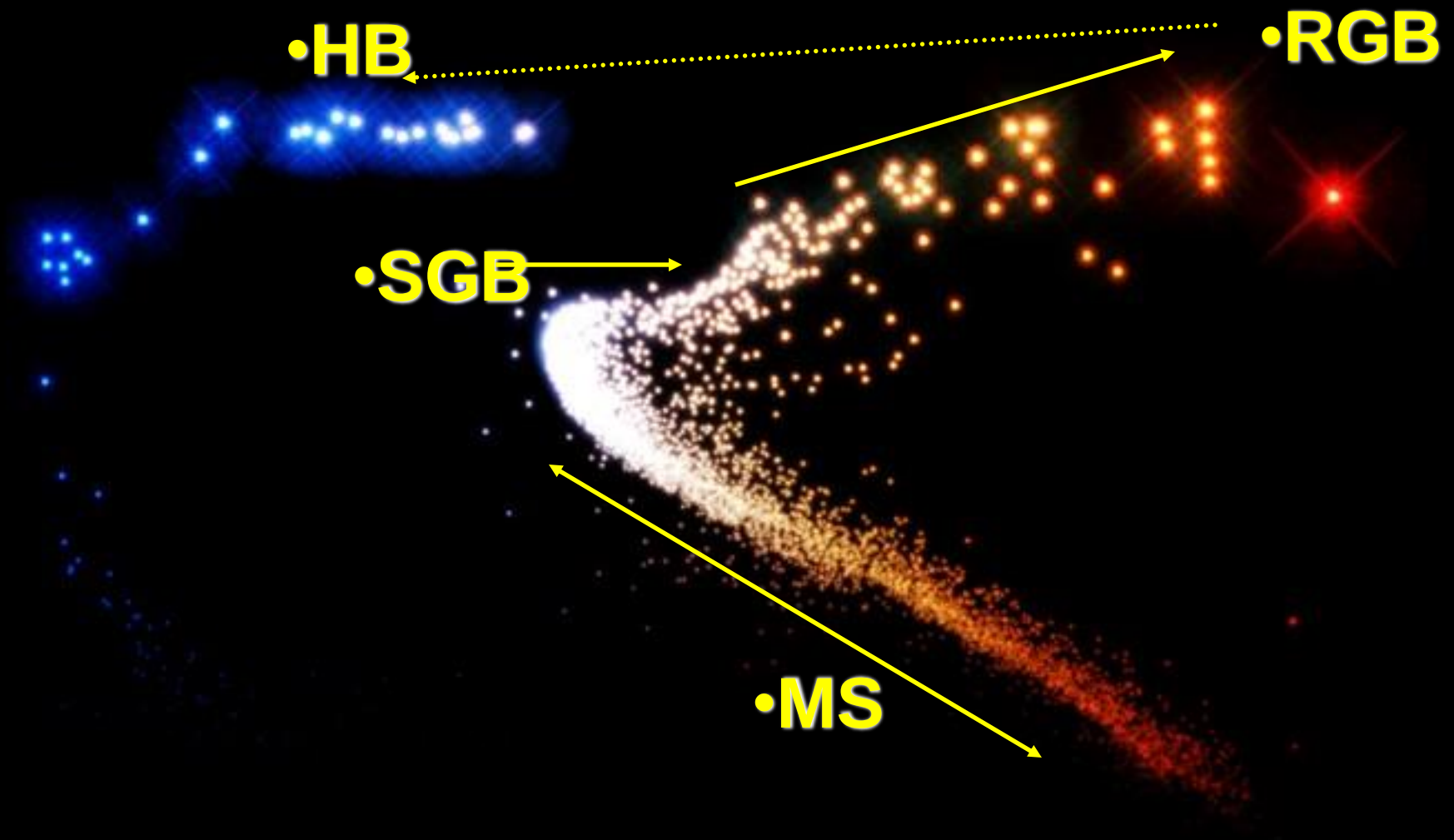
When the core has enough mass, it is finally able to ignite helium into carbon.



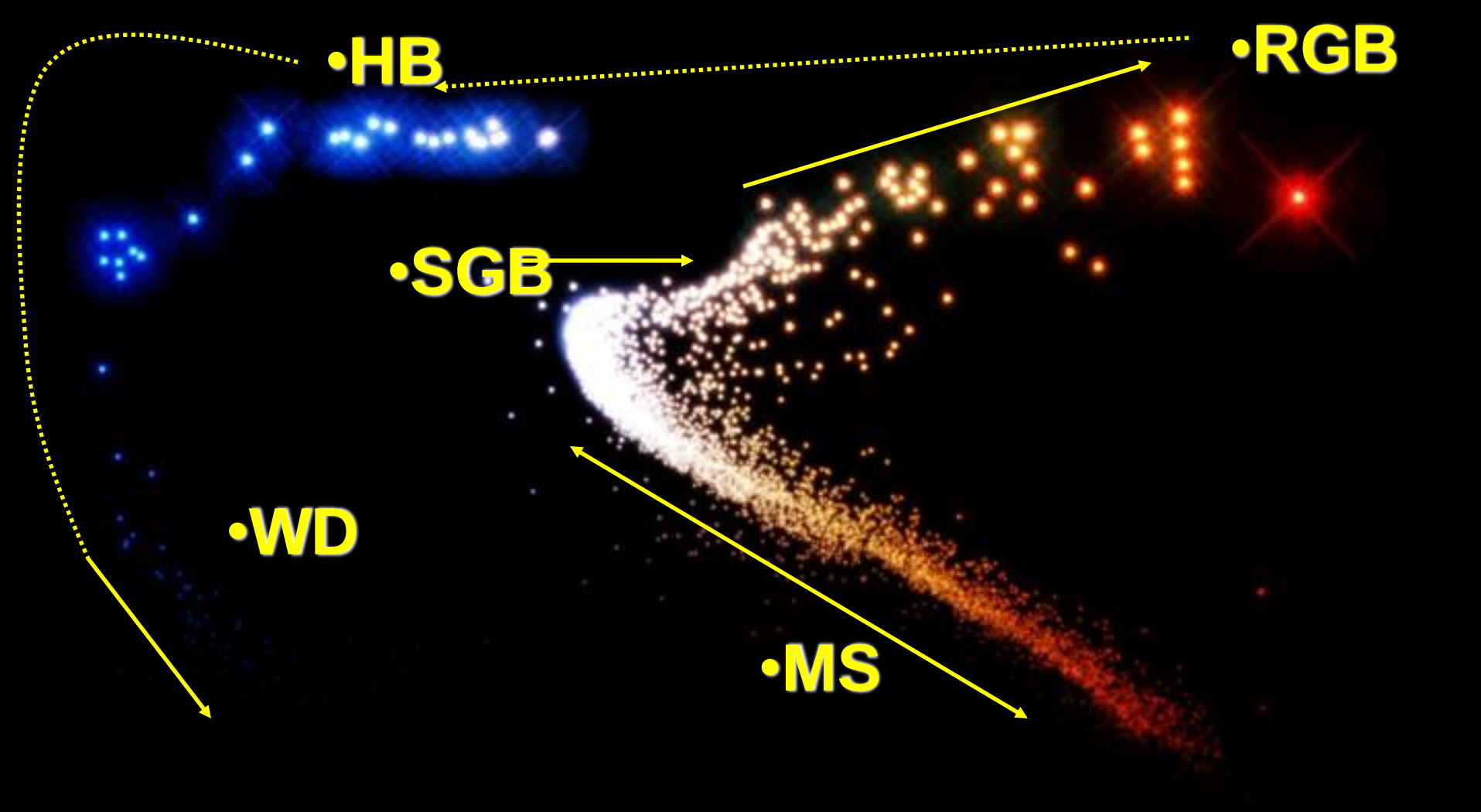
The star readjusts its structure again and finds itself on the **Horizontal Branch (HB)**.



The helium fuel is not as potent as the hydrogen, so it runs out quickly.

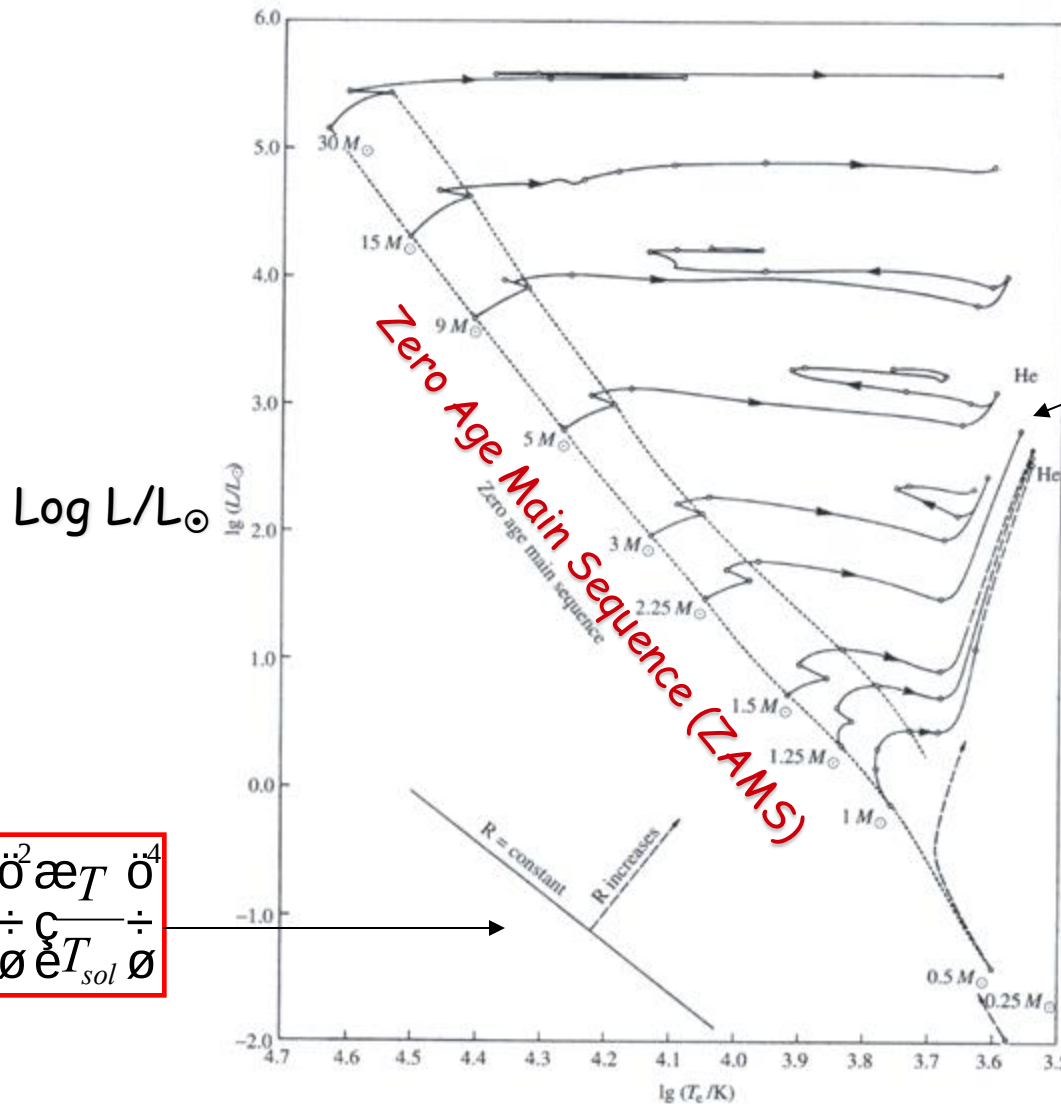


That is why there are so few stars on the **HB** compared to the **MS**. Stars do not spend much time on the **HB**.



When the helium is gone, the star has no more fuel.
With nothing left to burn, it fades away into blue
darkness as a **White Dwarf (WD)**.

La séquence principale



Flash de
L'hélium

Combustion de
l'hydrogène en
hélium

phase la plus longue
de la vie d'une étoile

$$\frac{L}{L_{\text{sol}}} = \frac{\kappa_R}{\kappa_{R_{\text{sol}}}} \frac{\rho^2}{\rho_{\text{sol}}} \frac{T^4}{T_{\text{sol}}^4}$$

$\log T_{\text{eff}} (K)$



L'étoile quitte la
séquence principale
et devient une
géante (rouge).

-> création des éléments lourds

Temps caractéristiques (en millions d'années)

Etoiles chaudes
(bleues)



Etoiles froides
(rouges)

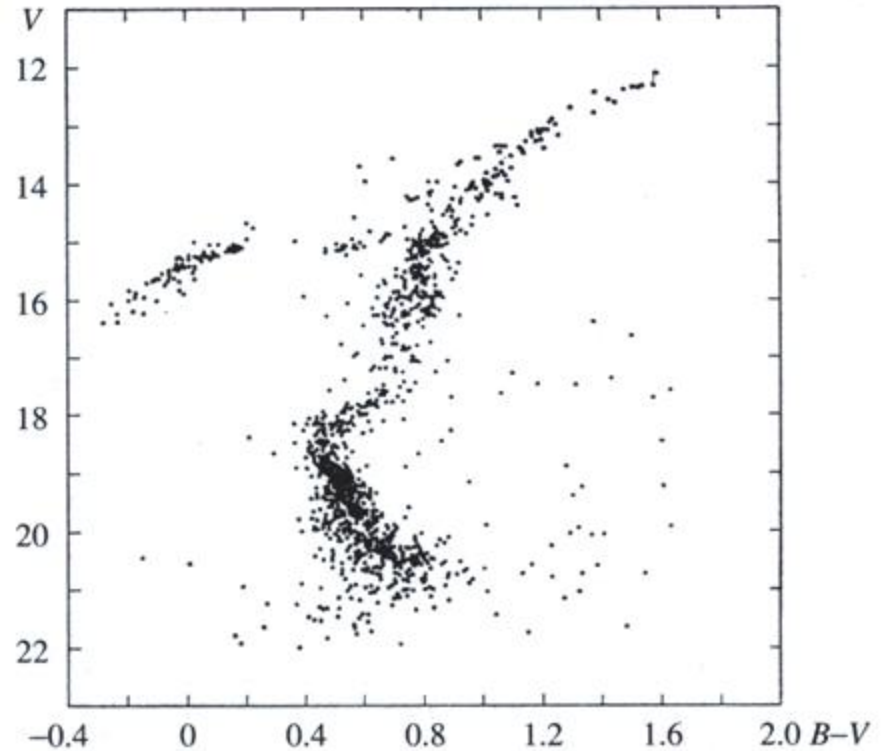
Masse $M_{\odot}$	Type spectral	Contraction vers seq. princ.	Temps sur seq. princ.	Seq. princ. vers. géante	Géante rouge
30	O5	0,02	5	0,55	0,3
15	B0	0,06	10	1,7	2
9	B2	0,2	22	0,2	5
5	B5	0,6	68	2	20
3	A0	3	240	9	80
1,5	F2	20	2000	280	—
1,0	G2	50	10^4	680	—
0,5	M0	200	3×10^4	—	—
0,1	M7	500	10^7	—	—

L'essentiel de la vie d'une étoile se déroule sur
la **séquence principale** où l'étoile tire son énergie de la fusion
de l'hydrogène en hélium

Age des amas d'étoiles

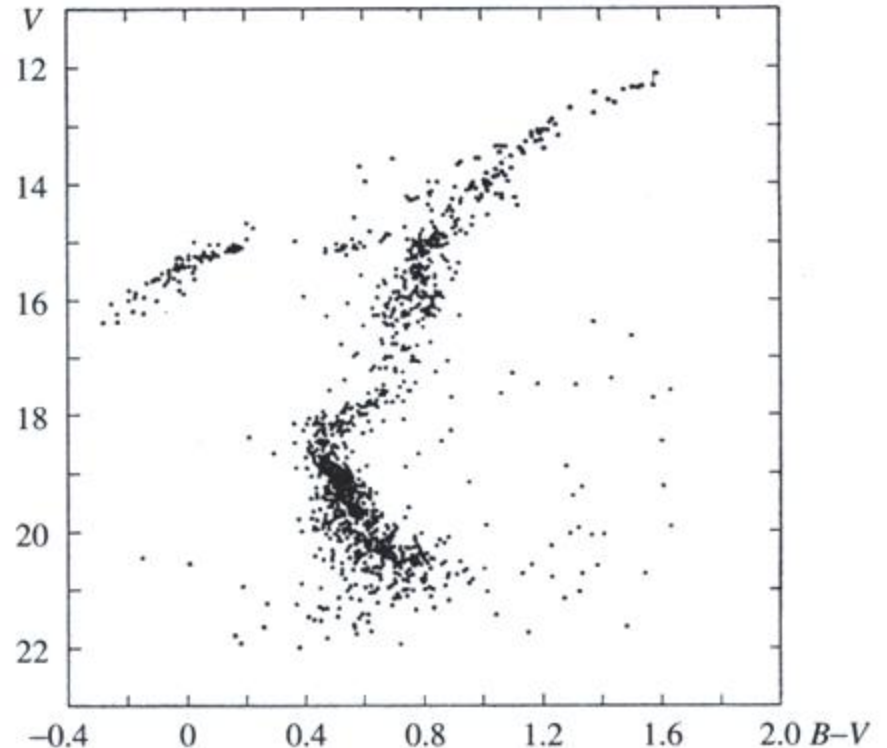
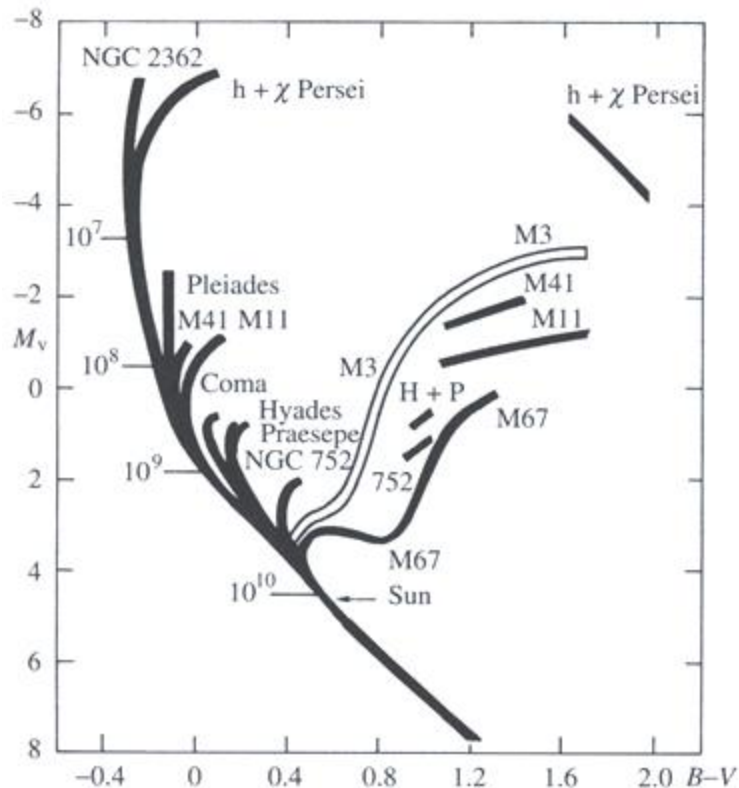
Age des amas stellaires

Amas globulaire M5: 160 al de diamètre, 13 milliards d'années



Age des amas stellaires

Amas globulaire M5: 160 al de diamètre, 13 milliards d'années

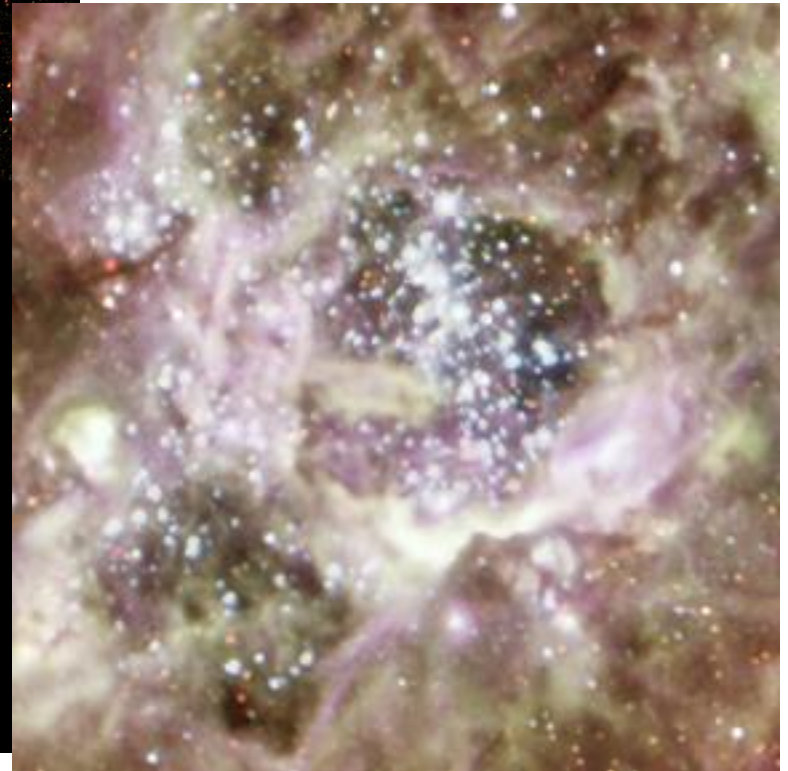


Détermination de l'âge si la distance est connue, à partir du « coude » (turn-off) de la séquence principale.

Age des amas stellaires

Amas très jeune (10^6 ans) :
Association OB

Ici NGC 607

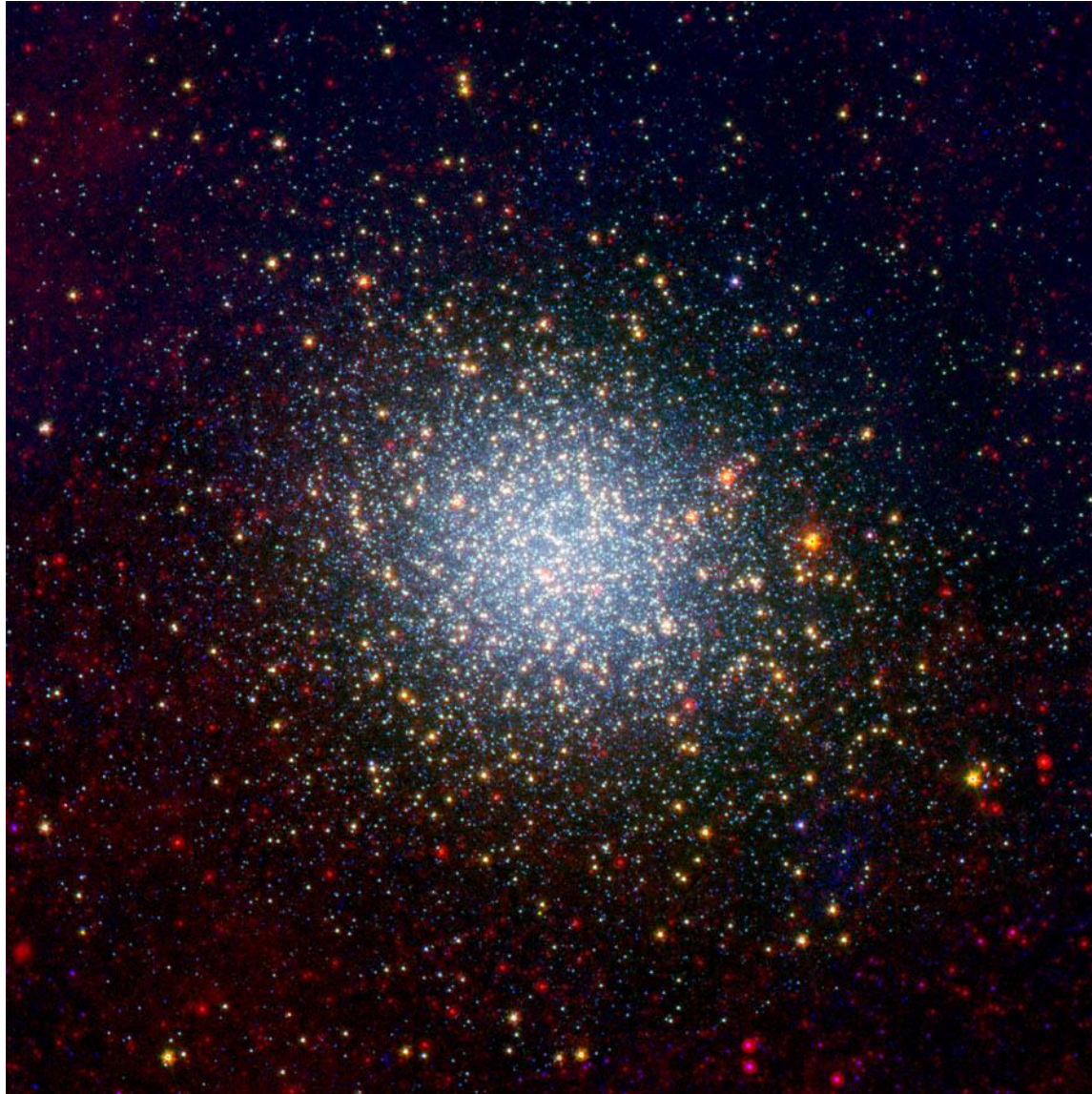


Age des amas stellaires

Amas jeune (10^7 - 10^8 ans) : amas « ouverts » (ici amas double de Persée)



Age des amas stellaires



Amas vieux (10^{10} - 10^{11} ans) :
Amas « globulaires »

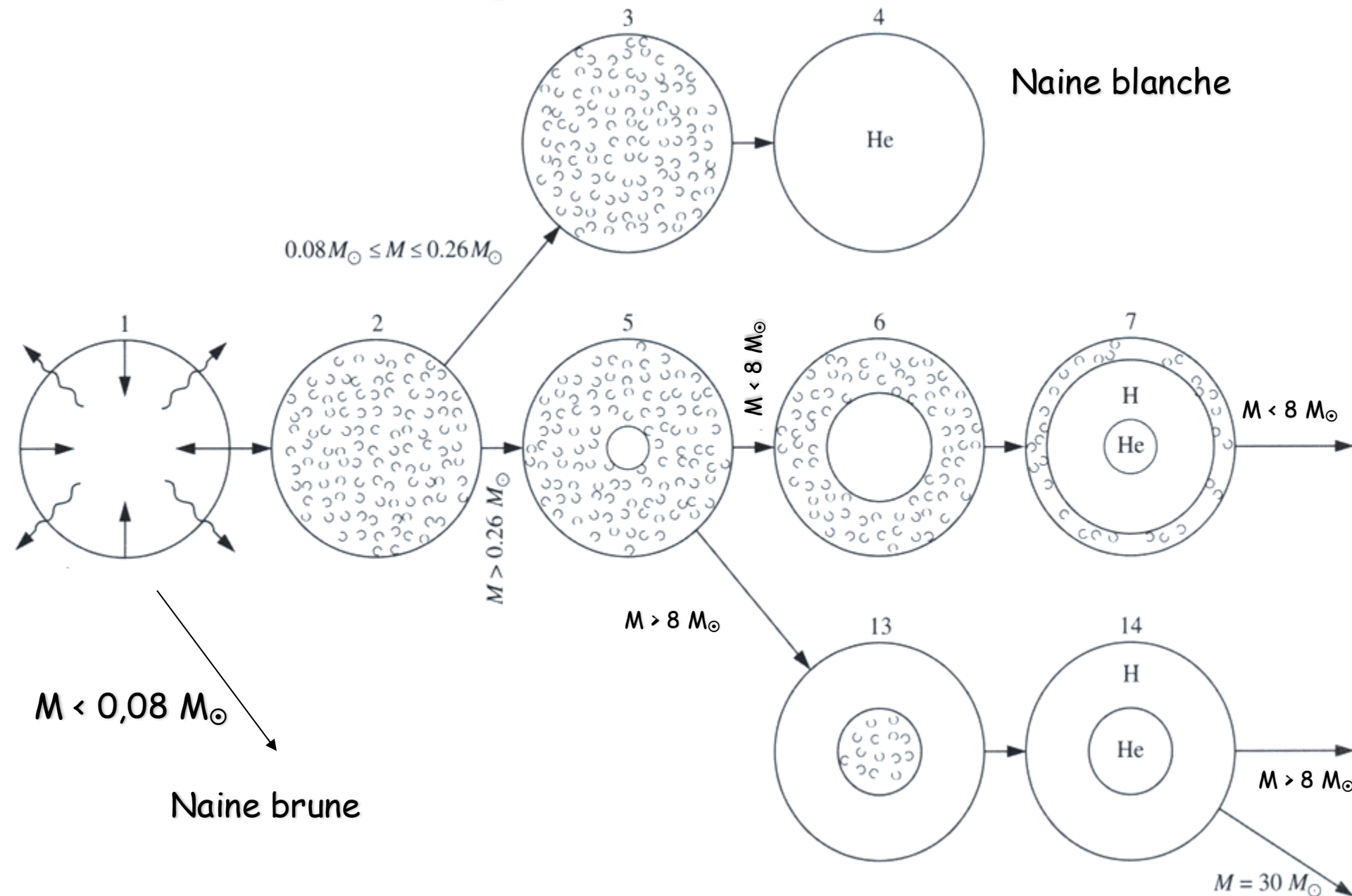
Ici Omega Centauri

Image du satellite Spitzer
dans l'infrarouge, permettant
d'étudier les géantes rouges
cachées par la poussière

Evolution stellaire

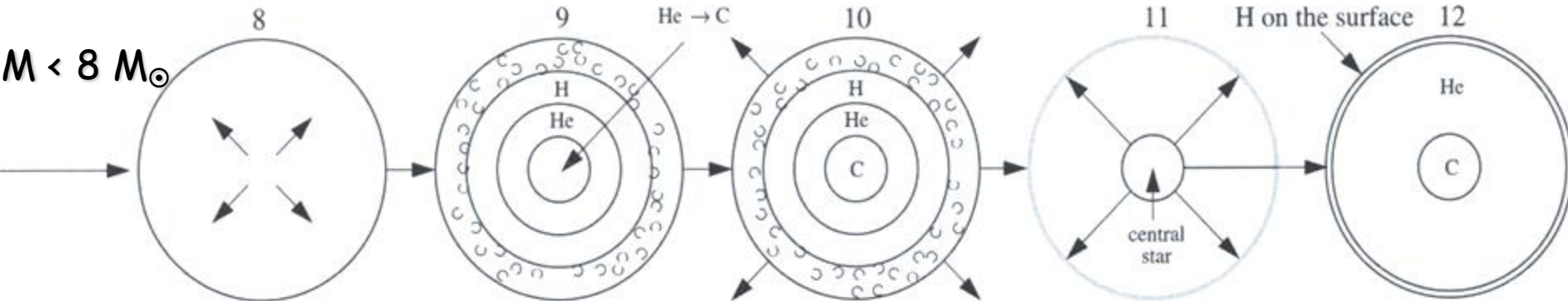


Evolution stellaire

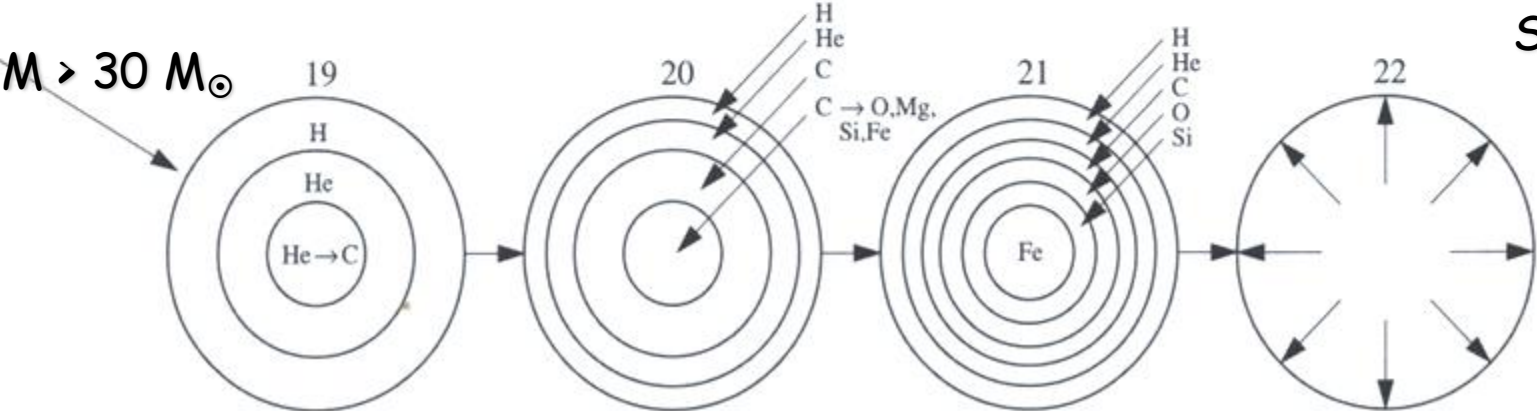
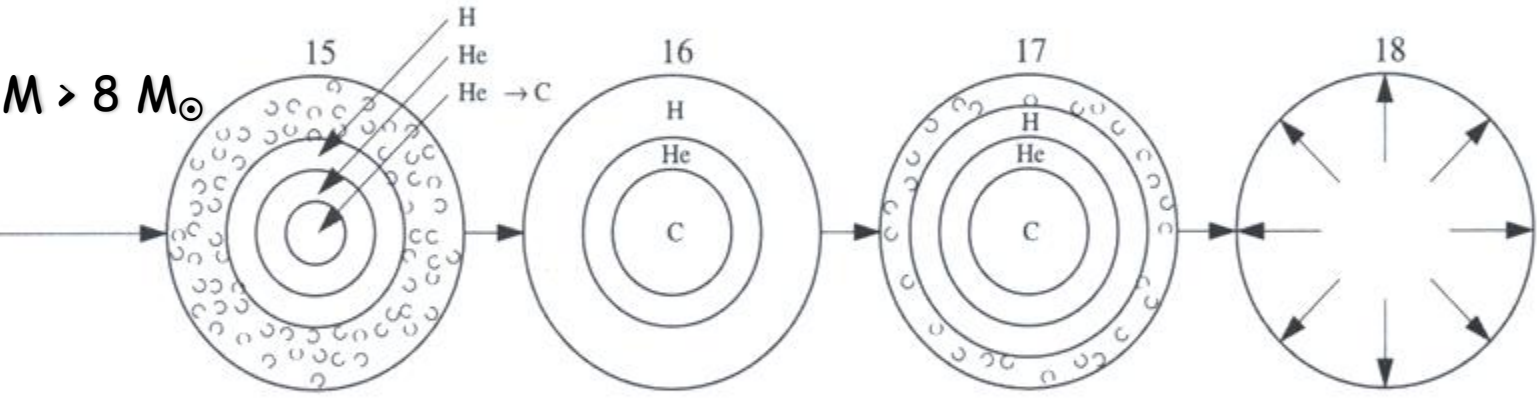




Evolution stellaire



Naine blanche
+ nébuleuse
planétaire



Supernovae

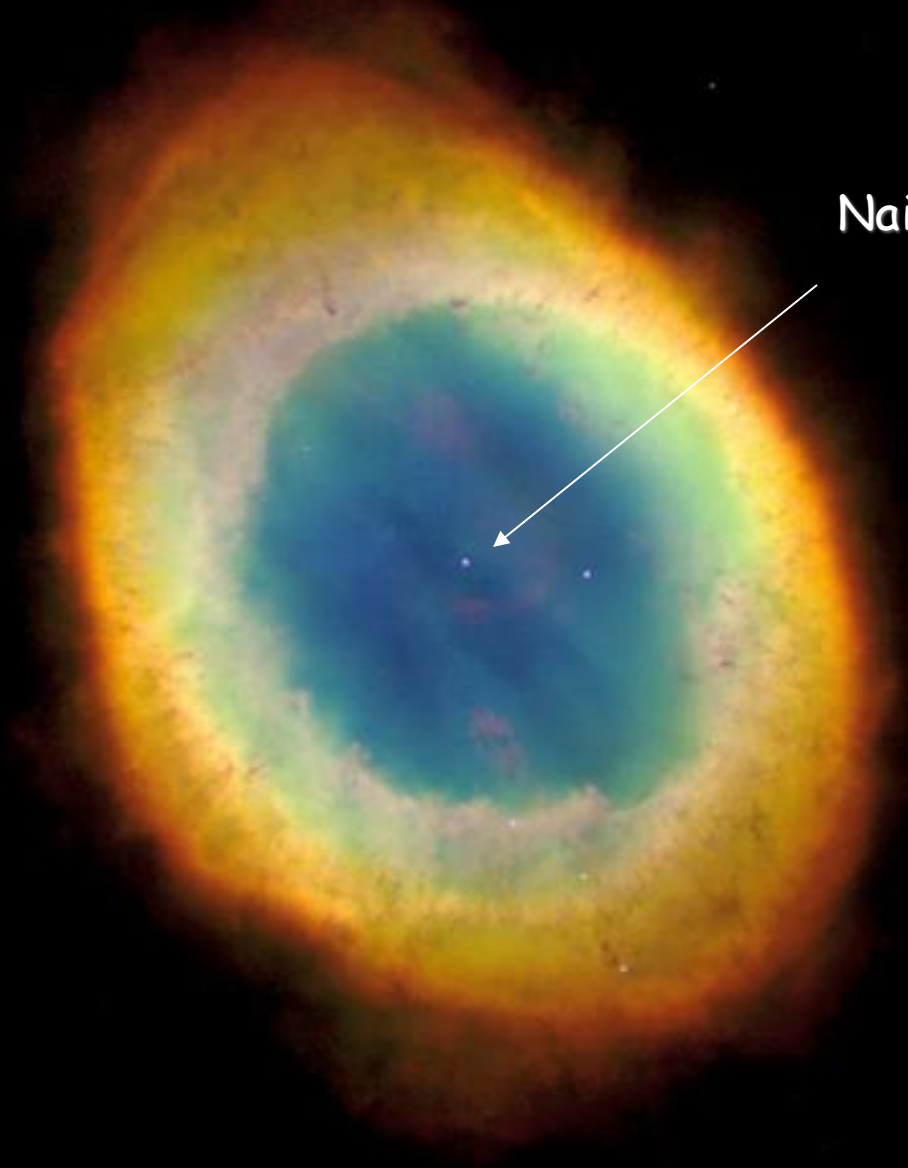
Mort des étoiles

Nébuleuses planétaires

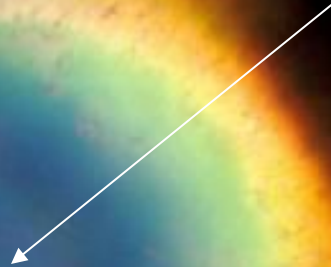
Naine blanche centrale:

- Etoile de faible masse ayant « brûlé » presque tout son hydrogène
- Effondrement, puis allumage de la fusion de l'Hélium
- Nouvelle contraction, mais insuffisante pour allumer la fusion du Carbone
- Arrêt de la contraction à cause de la « pression quantique » des électrons
- Si $M > 1,4 M_{\odot}$ (masse de Chandrasekhar) la contraction peut continuer
- Masse maximale des étoiles aboutissant à des naines-blanches: $8 M_{\odot}$
- Electrons et noyaux (protons) se combinent pour donner des neutrons
- Formation d'une étoile à neutrons

Nébuleuses planétaires (Messier 57)

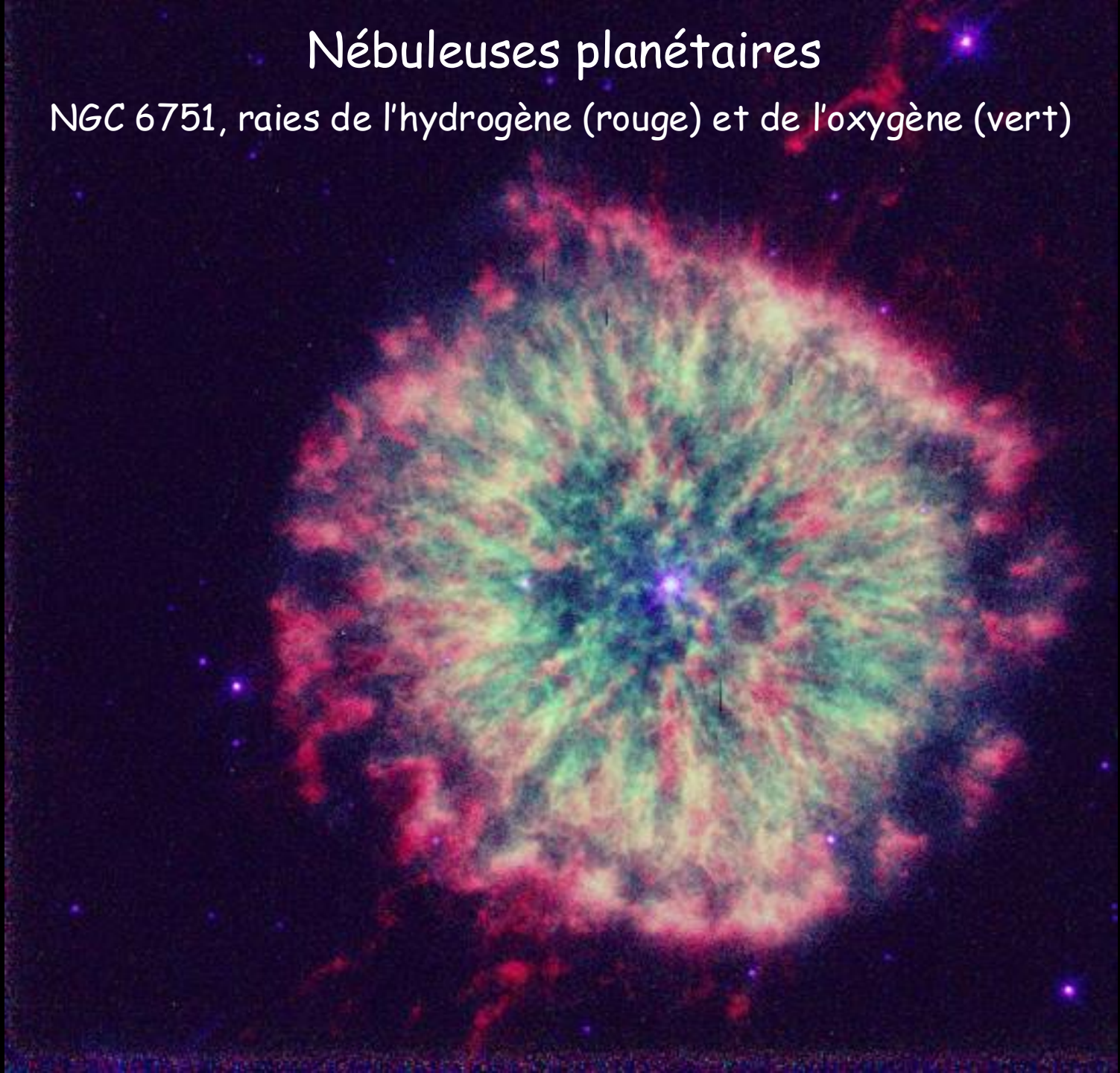


Naine blanche



Nébuleuses planétaires

NGC 6751, raies de l'hydrogène (rouge) et de l'oxygène (vert)



Mort des étoiles

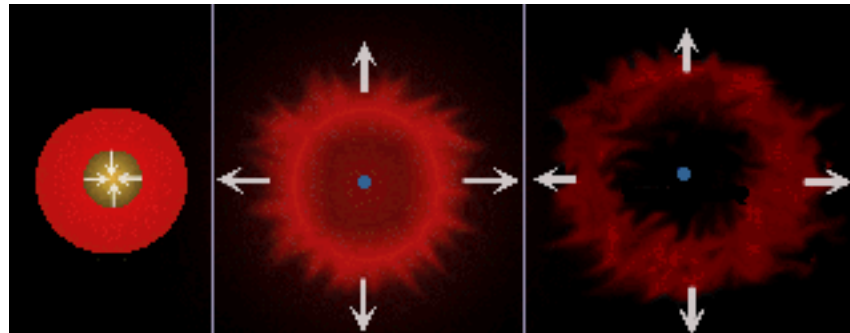
- $M < 8 M_{\odot}$ (nébuleuse planétaire)

Concerne la plupart des étoiles ($\sim 97\%$)
Expulsion des couches externes

- $8 M_{\odot} < M < 30 M_{\odot}$ (supernova)

Effondrement, explosion, résidus

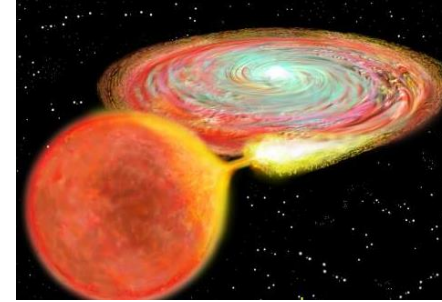
- $M > 30 M_{\odot}$ (supernova)



Différents types de supernovae

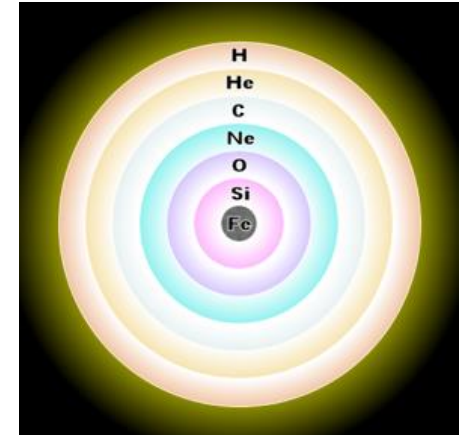
Supernovae thermonucléaires (Type I):

- Arrachement de matière dans un système
- binaire comportant une naine blanche.
- Détonation quand $M > 1,4 M_{\odot}$

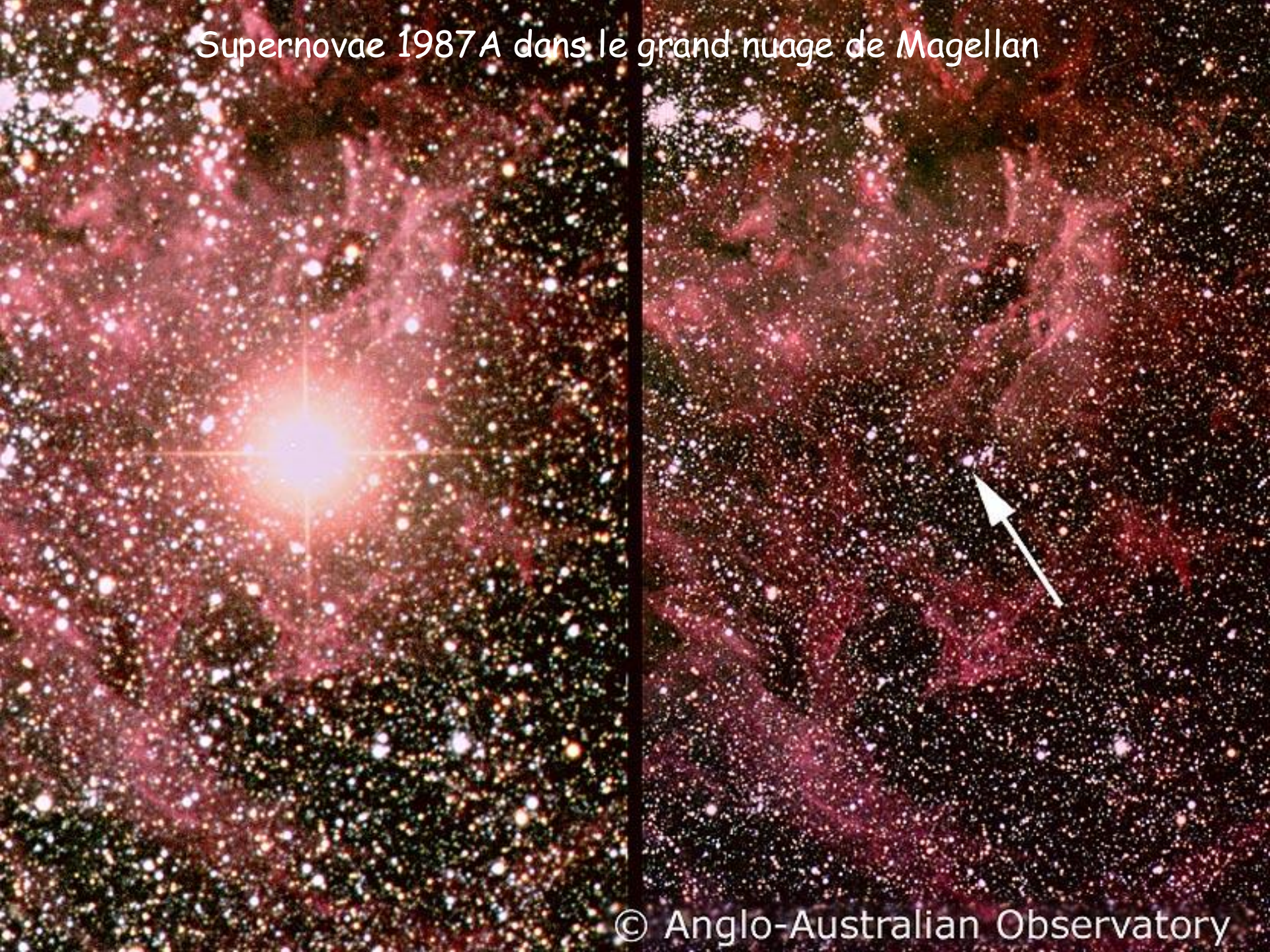


Supernovae par effondrement (Type II):

- Fusion du Fer endothermique $\rightarrow$ effondrement rapide
- Les noyaux de Fer sont dissociés $\rightarrow$ les protons et les électrons forment des neutrons (par « capture » électronique)
- Formation d'un cœur compact: étoile à neutrons maintenue par « dégénérescence » quantique
- Compression et éjection des couches externes $\rightarrow$ résidus de supernovae



Supernovae 1987A dans le grand nuage de Magellan



Restes de supernovae

Les « dentelles » du cygne



Restes de supernovae



Nébuleuse du « crabe » (explosion en 1024)

Supernovae dans d'autres galaxies



Supernovae dans d'autres galaxies (utiles en tant qu'indicateurs de distance)

