

Formation de l'hélium par les chaînes proton-proton ou le cycle CNO

Lorsque le rayonnement n'est plus assez efficace pour transporter l'énergie, la matière se met en mouvement comme l'eau qui bout dans une casserole : c'est la convection.

Parce que les intensités de leurs réactions nucléaires sont très différentes, les étoiles de faible masse n'ont pas la même structure que celles de grande masse : cœur radiatif et enveloppe convective pour les premières, cœur convectif et enveloppe radiative pour les secondes.

Tout se passe dans le cœur

On observe la **surface** des étoiles, mais tout ce qui détermine son évolution se passe dans son **cœur**. Celui-ci est chauffé à plusieurs millions de degrés à cause de la contraction gravitationnelle. C'est assez chaud pour déclencher des **réactions nucléaires**.

Ces réactions soutiennent l'étoile car l'énergie qu'elles génèrent produit une pression qui lutte contre la gravité. Les réactions nucléaires qui transforment l'hydrogène en hélium (voir TUIMP 14) soutiennent l'étoile pendant 90% de sa vie. Les étoiles de petite masse fusionnent directement l'hélium (cœur radiatif) pour former l'hélium (**chaînes proton-proton**). Les étoiles de grande masse utilisent les noyaux de carbone, azote et oxygène comme catalyseurs (**cycle CNO**) : ce qui leur permet une génération d'énergie bien plus intense, mais avec un temps de vie bien plus court.

Les réactions nucléaires des phases successives ont lieu de plus en plus profondément dans le cœur des étoiles massives. À la fin de l'évolution, les étoiles ont une structure de couches en pelure d'oignon.

Tous les éléments lourds sont fabriqués dans les étoiles. Ce tableau montre dans quel type d'étoile (d'après C. Kobayashi 2020).

Big Bang	Étoiles massives	Étoiles à moyenne et faible masses	Supernovae
H	H	H	H
He	He	He	He
Li	Li	Li	Li
B	B	B	B
C	C	C	C
N	N	N	N
O	O	O	O
Ne	Ne	Ne	Ne
Mg	Mg	Mg	Mg
Si	Si	Si	Si
S	S	S	S
Ar	Ar	Ar	Ar
K	K	K	K
Ca	Ca	Ca	Ca
Sc	Sc	Sc	Sc
Ti	Ti	Ti	Ti
V	V	V	V
Cr	Cr	Cr	Cr
Mn	Mn	Mn	Mn
Fe	Fe	Fe	Fe
Ni	Ni	Ni	Ni
Cu	Cu	Cu	Cu
Zn	Zn	Zn	Zn
Ga	Ga	Ga	Ga
Ge	Ge	Ge	Ge
As	As	As	As
Se	Se	Se	Se
Br	Br	Br	Br
Kr	Kr	Kr	Kr
Rb	Rb	Rb	Rb
Sr	Sr	Sr	Sr
Zr	Zr	Zr	Zr
Nb	Nb	Nb	Nb
Mo	Mo	Mo	Mo
Tc	Tc	Tc	Tc
Ru	Ru	Ru	Ru
Rh	Rh	Rh	Rh
Pd	Pd	Pd	Pd
Ag	Ag	Ag	Ag
Cd	Cd	Cd	Cd
In	In	In	In
Sn	Sn	Sn	Sn
Sb	Sb	Sb	Sb
Te	Te	Te	Te
I	I	I	I
Xe	Xe	Xe	Xe
Ba	Ba	Ba	Ba
La	La	La	La
Ce	Ce	Ce	Ce
Pr	Pr	Pr	Pr
Nd	Nd	Nd	Nd
Pm	Pm	Pm	Pm
Eu	Eu	Eu	Eu
Gd	Gd	Gd	Gd
Tb	Tb	Tb	Tb
Dy	Dy	Dy	Dy
Ho	Ho	Ho	Ho
Er	Er	Er	Er
Tm	Tm	Tm	Tm
Yb	Yb	Yb	Yb
Lu	Lu	Lu	Lu

Pourquoi les étoiles brillent

On s'est longtemps demandé ce qui fait briller le Soleil. Est-ce qu'il brûle du charbon ? Est-ce qu'il brûle des réactions chimiques ? On a finalement compris que le Soleil brûle simplement parce qu'il est fait de gaz très chaud, donc lumineux dans la lumière visible. Selon leur température, les corps ont un pic de luminosité à des longueurs d'onde différentes. Le diagramme ci-contre montre la luminosité en fonction de la longueur d'onde. Les étoiles brillent dans la lumière visible. Les êtres vivants sont lumineux aussi, mais dans l'infrarouge. L'énergie émise par un chat par unité de masse est 5 000 fois plus grande que celle émise par le Soleil par unité de masse. C'est parce que les réactions chimiques (le métabolisme) sont plus efficaces pour produire de la chaleur.

L'Univers dans ma poche

La vie des étoiles

TUIMP N° 29 THE UNIVERSE IN MY POCKET

Sylvia Ekström
Université de Genève

Quiz

Type spectral : G2

Soleil	Luminosité	Type spectral
Soleil	1	G2
Sirius A	25	A1
Canopus	136000	F0
Bételgeuse	1050000	M2

- Quelle est la plus froide de ces étoiles ? La plus chaude ?
- Quelles sont les masses de ces étoiles ?
- Quelles sont celles qui n'ont pas fini de brûler tout l'hydrogène de leur cœur ?
- Quelles sont les étoiles qui finiront en supernova ?
- Quelle est l'étoile qui vivra le plus longtemps ?

Les étoiles : des usines à éléments

Après avoir brûlé l'hydrogène puis l'hélium dans leur cœur, les étoiles les plus massives utilisent successivement le **carbone**, le **néon**, l'**oxygène** et le **silicium** comme combustible, formant des éléments de plus en plus lourds, de plus en plus profondément dans leur cœur. L'évolution s'accélère car l'étoile produit de plus en plus de **neutrons**, qui emportent l'énergie générée dans le cœur sans interagir avec l'étoile. Le carbone brûle en quelques milliers d'années, alors que le silicium ne soutient l'étoile que pendant quelques jours !

Certains éléments ainsi fabriqués dans le cœur des étoiles sont éjectés dans le milieu interstellaire par les nébuleuses planétaires ou les supernovae. D'autres restent emprisonnés à jamais dans les naines blanches, les étoiles à neutrons ou les trous noirs et ne participent pas à l'évolution chimique de l'Univers.

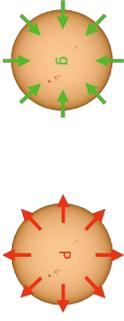
Le diagramme représente la luminosité d'un corps en fonction de la longueur d'onde. Plus le corps est froid plus le pic de luminosité se déplace vers les grandes longueurs d'onde.

Photo d'un chat prise avec une caméra thermique, sensible dans l'infrarouge. Le nez étant plus froid apparaît moins lumineux.



La couleur des étoiles indique leur température de surface. Les plus chaudes sont bleues, les plus froides rouges.

La gravitation (g) fait se contracter l'étoile. Le gaz s'échauffe et génère une pression (P) qui lutte contre la gravitation : c'est l'« équilibre hydrostatique ».



La gravitation (g) fait se contracter l'étoile. Le gaz s'échauffe et génère une pression (P) qui lutte contre la gravitation : c'est l'« équilibre hydrostatique ».

La séquence principale

Quand on porte les étoiles dans un diagramme de luminosité en fonction de la température, on voit que 90% d'entre elles se placent sur une grande diagonale appelée **Séquence principale**. Ceci montre que pour la plupart des étoiles, il existe un lien entre la luminosité et la température : les étoiles les plus lumineuses sont aussi les plus chaudes. On classe les étoiles selon leur **type spectral**, défini par la présence et l'intensité de leur raies spectrales (voir TUIIMP 3O), qui sont fonction de leur température de surface (et donc de leur couleur) : **O, B, A, F, G, K, M**, du plus chaud au moins chaud. Chaque classe va de **O** à **S**. Les étoiles **O** et **B** sont les plus rares. En effet, ces étoiles de plus de 8 masses solaires ne représentent que **O, 1 B%** de toutes les étoiles. Le Soleil est de classe **G2**.

- Réponses aux questions:
- 1) Bételgeuse, Sirius A.
 - 2) 1, 2, 10, 20 masses solaires.
 - 3) Le Soleil et Sirius A.
 - 4) Bételgeuse et Canopus.
 - 5) Le Soleil.

Sur le diagramme les positions du Soleil, de Sirius A, de Bételgeuse et de Canopus sont représentées par les lettres S, A, B et C.

Solutions

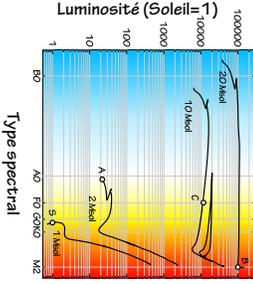
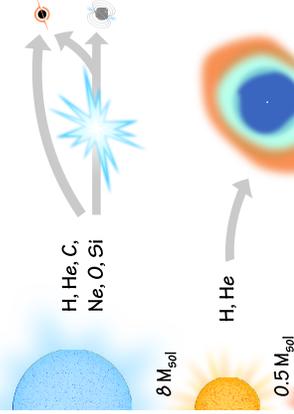


Schéma de l'évolution des étoiles en fonction de leur masse initiale



Les étoiles les moins massives ne brûlent que l'hydrogène. Celles dont la masse est entre 0,5 et 8 fois la masse du Soleil brûlent aussi l'hélium, puis finissent leur vie en naine blanche entourée d'une nébuleuse planétaire. Les étoiles de plus de 8 masses solaires fusionnent des atomes encore plus gros, comme le carbone, le néon, l'oxygène et le silicium. Elles finissent par exploser en supernova ou s'effondrent en trou noir.



Pour en savoir plus sur cette collection et sur les sujets présentés dans ce mini-livre, tu peux consulter le site <http://www.tuiimp.org>.

Image de couverture : Aperçu de l'intérieur du Soleil. Le cœur surchauffé génère de l'énergie grâce à des réactions nucléaires. L'enveloppe est brassée par la convection comme l'eau dans une casserole. L'ensemble des images de ce mini-livre sort de SYMIA Ekström, sauf les chaînes de réactions de la page 8 (Wikimedia Commons) et la photo du chat.

Sylvia Ekström, de l'Observatoire de Genève, est l'auteur de ce mini-livre, écrit en 2025. Gracyna Stasińska (de l'Observatoire de Paris) et Stan Kurtz (de l'ISYA, Mexique) en ont effectué la révision.

L'Univers dans ma poche N° 29

Comment les étoiles évoluent

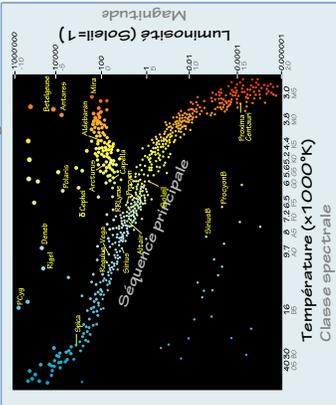
Lorsque l'hydrogène est épuisé dans le cœur, celui-ci se contracte, augmentant sa température jusqu'à atteindre la température de fusion de l'hélium. Cette contraction libère de l'énergie gravitationnelle et fait enfler l'enveloppe, l'étoile devient **géante rouge**. Lorsque l'hélium est épuisé, le cœur se contracte à nouveau. Pour les étoiles de moins de 8 masses solaires, c'est la fin de l'évolution. Leur cœur se transforme en **naine blanche** et évolue plus. Il se refroidit lentement alors que l'atmosphère devient une **nébuleuse planétaire** (voir TUIIMP 3O). Les étoiles massives, elles, arrivent à atteindre des températures très élevées dans leur cœur, et peuvent enchaîner des phases de fusion, entrainées par des phases de contraction. L'évolution des étoiles massives se termine par l'explosion en **supernova** ou l'effondrement direct en **trou noir**.

Visuellement, une étoile plus chaude est **bleutée**, comme l'étoile Rigel dans la constellation d'Orion, alors qu'une étoile plus « froide » est **rougeâtre**, comme Bételgeuse, également dans Orion. Notre étoile le Soleil, avec ses presque 6000°K, est **jaune**.

C'est une **grosse** boule de gaz **chaud**. Comme elle est **grosse**, la gravitation la fait se contracter sur elle-même et cette compression du gaz l'échauffe : le gaz réagit en agitant les atomes qui le compose, ce qui produit une pression qui vient lutter contre la gravitation. Plus l'étoile est massive, plus la gravité est forte, et plus l'étoile est chaude et lumineuse.

Qu'est-ce qu'une étoile ?

Luminosité en fonction de température des étoiles dans le voisinage du Soleil.



Au cours de leur vie les étoiles se déplacent dans ce diagramme. La séquence principale est le lieu où elles restent le plus longtemps.

Type spectral	Température (°K)	% d'étoiles
O	>50 000	0,05
B	9 700-30 000	0,13
A	7 200-9 700	0,6
F	6 000-7 200	3
G	5 200-6 000	7,6
K	3 900-5 200	12,1
M	2 500-3 900	76,5