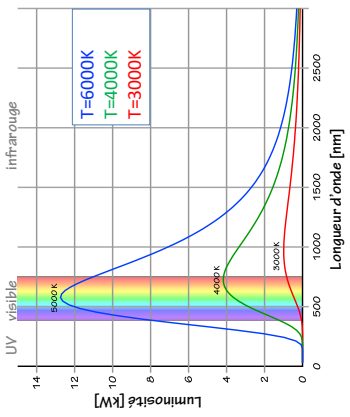


Pourquoi les étoiles brillent

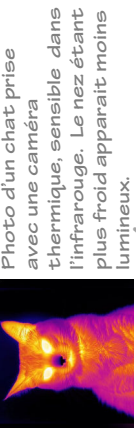
On s'est longtemps demandé ce qui fait briller le Soleil. Est-ce qu'il brûle du charbon ? Est-ce qu'il subit des réactions chimiques ? On a finalement compris que le Soleil brille simplement parce qu'il est fait de gaz très chaud, donc lumineux dans la lumière visible.

Selon leur température, les corps ont un pic de luminosité à des longueurs d'onde différentes. Le diagramme ci-dessous montre la luminosité en fonction de la longueur d'onde. Les étoiles brillent dans la lumière visible.

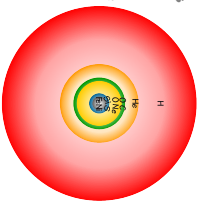
Les êtres vivants sont lumineux aussi, mais dans l'infrarouge. L'énergie émise par un chat par unité de masse est 5 000 fois plus grande que celle émise par le Soleil par unité de masse. C'est parce que les réactions chimiques (le métabolisme) sont plus efficaces pour produire de la chaleur.



Ce 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'ondes.



Big Bang															
Évolution des éléments															
Éléments	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	H	He	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne	Na	Mg	Al	Si	P
2															
3															
4															
5															
6															
7															
8															
9															
10															
11															
12															
13															
14															
15															
16															
17															
18															
19															
20															
21															
22															
23															
24															
25															
26															
27															
28															
29															
30															
31															
32															
33															
34															
35															
36															
37															
38															
39															
40															
41															
42															
43															
44															
45															
46															
47															
48															
49															
50															
51															
52															
53															
54															
55															
56															
57															
58															
59															
60															
61															
62															
63															
64															
65															
66															
67															
68															
69															
70															
71															
72															
73															
74															
75															
76															
77															
78															
79															
80															
81															
82															
83															
84															
85															
86															
87															
88															
89															
90															
91															
92															
93															
94															
95															
96															
97															
98															
99															
100															



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

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.

Quiz

Ce diagramme montre l'évolution d'étoiles de 1, 2, 10 et 20 masses solaires.

Place dessous les étoiles suivantes :

Soleil	Sirius A	Canopus	Bételgeuse
Luminosité 1	25	13600	105000
Type spectral G2	A1	F0	M2

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

L'Univers dans ma poche

La vie des étoiles

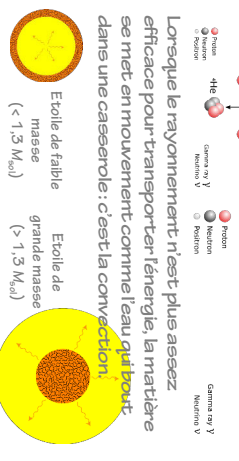
Sylvia Ekström
Université de Genève

TUIMP
N° 29
THE UNIVERSE IN MY POCKET

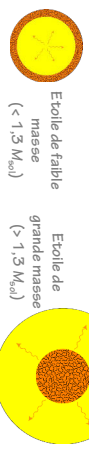
Tout se passe dans le cœur

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 les protons entre eux 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.



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 !

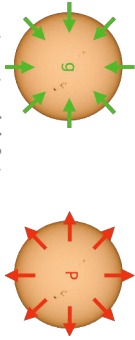


Parce que les intensités de leurs réactions nucléaires sont très différentes, les étoiles de faible masse n'ont pas la même structure que celles de grande masse : cœur radiatif et enveloppe convective pour les premières, cœur convectif et enveloppe radiative pour les secondes.



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 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.

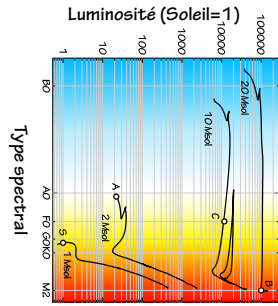
On classe les étoiles selon leur **type spectral**, défini par la présence et l'intensité de leur raies spectrales (voir TUIMP 3O), qui sont fonction de leur température de surface (et donc de leur couleur) : **O, B, A, F, G, K, M**, du plus chaud au moins chaud. Chaque classe va de **O** à **M**. Les étoiles **O** et **B** sont les plus rares. En effet, ces étoiles de plus de 8 masses solaires ne représentent que 0,1 % de toutes les étoiles.

Le Soleil est de classe **G2**.

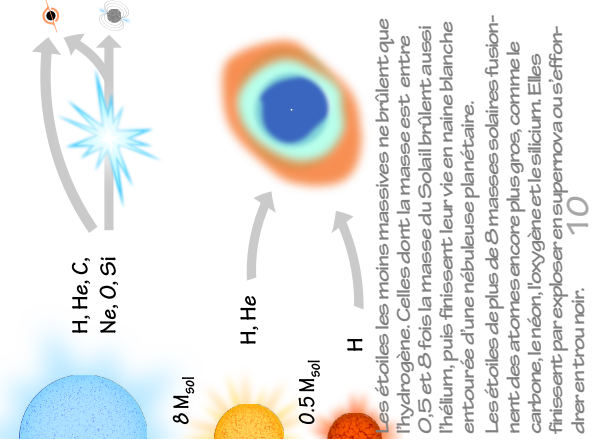
- Réponses aux questions:
- 1) Bételgeuse, Sirius A.
 - 2) 1, 2, 10, 20 masses solaires.
 - 3) Le Soleil et Sirius A.
 - 4) Bételgeuse et Canopus.
 - 5) Le Soleil.

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



Comment les étoiles évoluent en fonction de leur masse initiale



TUIMP Creative Commons



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



L'Univers dans ma poche N° 29

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

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 sont de Sylvia Ekström, sauf les chaînes de réactions de la page B (Wikimedia Commons) et la photo du chat.

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 **naïve blanche** et évolue plus. Il se refroidit lentement alors que l'atmosphère devient une **nébuleuse planétaire** (voir TUIMP 3G).

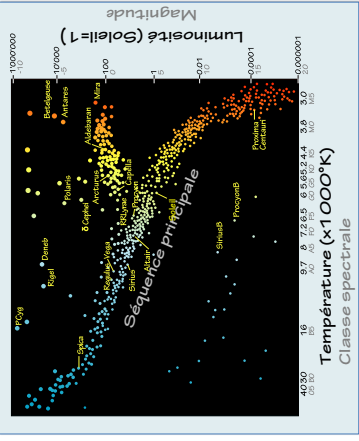
Les étoiles massives, elles, arrivent à atteindre des températures très élevées dans leur cœur, et peuvent enchaîner des phases de fusion, entrecoupées par des phases de contraction. L'évolution des étoiles massives se termine par l'explosion en **supernova** ou l'effondrement direct en **trou noir**.

Qu'est-ce qu'une étoile ?

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.

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.

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	>30 000	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