

LES ÉTOILES ET LA GALAXIE

Christian SCOTTA

Dans ce fascicule, Christian Scotta, nous présente les étoiles, depuis leurs propriétés fondamentales telles que leur brillance et leur couleur, leurs distances et leur classification, jusqu'à leur cycle de vie, de la naissance par fusion nucléaire à leur destin ultime, qu'il s'agisse de naines blanches, d'étoiles à neutrons ou de trous noirs.

Il se penche également sur les étoiles doubles et variables avant d'analyser en profondeur notre propre Galaxie, la Voie Lactée, en détaillant sa structure, la répartition de ses étoiles en amas, les populations stellaires, ainsi que sa dynamique de rotation et sa masse.



N° 13

LES ÉTOILES ET LA GALAXIE

Christian SCOTTA



SOCIÉTÉ
d'ASTRONOMIE
DE NANTES

X,00 €

Société Scientifique d'Éducation Populaire agréée Jeunesse et Sports
35, boulevard Louis Millet - 44300 NANTES - Tél. 02 40 68 91 20 - Fax 02 40 93 81 23
Internet : www.san-fr.com - E-mail : san@san-fr.com

Les Cahiers de la SAN

Les « **Cahiers de la SAN** » sont édités par la Société d'Astronomie de Nantes,
Société Scientifique d'Éducation Populaire agréée Jeunesse et Sports.

35, boulevard Louis-Millet

44300 NANTES

Tél. 02 40 68 91 20 - Fax 02 40 93 81 23 - E-mail : san@san-fr.com

© Toute reproduction intégrale ou partielle faite par quelque procédé que ce soit,
sans l'autorisation de la Société d'Astronomie de Nantes, est interdite.

LES ÉTOILES ET LA GALAXIE

Christian SCOTTA

Qualité auteur

Édition 2006

provoquer l'enroulement des bras spiraux après quelques révolutions. Le maintien de telles structures n'a pas encore reçu de réponses satisfaisantes à ce jour.

5.5 Masse de la Galaxie

Pour avoir une idée de la masse de la Galaxie, on peut supposer que le Soleil tourne dans le vide autour du noyau galactique. Sachant que la distance du Soleil au centre de la Galaxie est de 2 milliards d'unités astronomiques et que la période de révolution est de 250 millions d'années, la 3^e loi de Kepler permet d'en déduire la masse de la Galaxie comme on l'a fait pour les étoiles doubles. On pose :

En tenant compte du fait que la Galaxie est étendue, sa masse est de l'ordre de 100 à 200 milliards de masses solaires.

5.6 Les révolutions des amas globulaires

Les amas globulaires tournent selon des ellipses centrées sur le noyau de la Galaxie. Par exemple, la distance de l'amas d'Oméga du Centaure, dans l'hémisphère sud, varie de 6 000 à 21 000 années-lumière par rapport au centre de la Galaxie. Mais les amas globulaires ne tournent pas autour d'un objet compact, mais autour d'une Galaxie étendue, ce qui entraîne une rotation des grands axes des ellipses décrites par les amas globulaires. D'autre part, certaines orbites amènent les amas globulaires à traverser le disque de la Galaxie. La grande cohésion de leurs étoiles permet aux amas globulaires d'effectuer cette traversée sans se désagréger.

Les citations sont de Victor Hugo (Abîme : la Fin de Satan)

© Société d'Astronomie de Nantes, 1998

Table des Matières

1 Les étoiles.....	7
1.1 La magnitude.....	8
1.2 Les distances des étoiles.....	9
1.3 La couleur des étoiles.....	10
1.4 Le diagramme Hertzsprung-Russell.....	11
1.5 L'analyse spectrale.....	12
1.6 Les dimensions des étoiles.....	12
2 La vie des étoiles.....	14
2.1 D'où provient l'énergie des étoiles ?.....	14
2.2 L'évolution stellaire.....	15
2.3 Le destin des étoiles.....	16
3 Les étoiles doubles.....	24
4 Les étoiles variables.....	26
4.1 Les binaires à éclipses.....	26
4.2 Les variables pulsantes : les Céphéïdes.....	26
5 La Galaxie.....	28
5.1 Répartition des étoiles.....	28
5.2 Gaz et poussières dans la Galaxie.....	29
5.3 Populations stellaires.....	30
5.4 Rotation de la Galaxie.....	30
5.5 Masse de la Galaxie.....	31

5.6 Les révolutions des amas globulaires. 32

5.3 Populations stellaires

La population 1 représente 83 % des étoiles. Il s'agit d'étoiles jeunes et lumineuses souvent bleues et associées à des nuages de matière interstellaire comme les nébulosités autour des étoiles des Pléiades. Leur composition chimique est semblable à celle du Soleil, c'est-à-dire que ces étoiles sont riches en éléments lourds. Elles sont situées principalement dans le disque galactique.

La population 2 regroupe des étoiles vieilles, déficitaires en éléments lourds et situées dans le bulbe central de la Galaxie et dans les amas globulaires.

On en déduit que la population 2 représente les étoiles de la première génération, celles qui ont synthétisé les éléments lourds qu'elles dispersent ensuite en explosant. Les étoiles de la population 1 sont de la 2e ou de la 3e génération et sont nées de la contraction de nuages riches en éléments lourds.

5.4 Rotation de la Galaxie

Les étoiles tournent autour du centre de la Galaxie avec des vitesses variables selon leur éloignement de ce centre.

La partie centrale de la Galaxie, essentiellement le bulbe central, tourne d'un bloc, comme une planète solide. En effet, jusqu'à 25 000 années-lumière du centre, la vitesse linéaire de rotation augmente avec la distance au centre, c'est-à-dire que la vitesse angulaire est constante. Les étoiles, proches les unes des autres, sont fortement liées par la gravitation.

Plus loin, entre 25 000 et 40 000 années-lumière du centre, la vitesse linéaire est pratiquement constante et égale à environ 250 km.s⁻¹, ce qui signifie que la vitesse angulaire décroît avec la distance : on parle alors de rotation différentielle.

Enfin, vers la périphérie, les étoiles obéissent aux lois de Kepler, c'est-à-dire que la vitesse décroît avec la racine carrée de la distance. Mais elles ne sauraient s'y conformer de façon rigoureuse car les étoiles exercent des attractions les unes sur les autres.

La rotation, différentielle ou keplerienne, devrait

ont été mis en évidence par la radioastronomie.

5.1 Répartition des étoiles

La moitié des quelques 150 milliards d'étoiles de notre Galaxie sont isolées. Les autres sont soit groupées en systèmes doubles ou multiples dans le bulbe ou le disque, soit disposées en amas ouverts situés dans les bras spiraux ou encore formant des amas globulaires autour de la Galaxie.

Les amas ouverts

On peut voir, dans la constellation du Taureau, deux amas ouverts : les Pléiades, distantes de 500 années-lumière, comportant quelque 500 étoiles dans un volume de 50 années-lumière de diamètre. Seules 7 étoiles sont visibles à l'oeil nu. Elles portent les noms suivants : Astérope, Taygète, Maïa, Celano, Alcyone, Electra et Mérope. Quant à l'amas des Hyades, il se trouve à 400 années-lumière de nous.

Les étoiles d'un même amas ouvert sont nées en même temps de la contraction du même nuage interstellaire. Mais, les étoiles composant ces amas se dispersent peu à peu, l'amas se diluant progressivement.

Les amas globulaires

Le plus célèbre est celui d'Hercule, à 30 000 années-lumière de nous et large de 130 années-lumière. Les étoiles y sont beaucoup plus resserrées que dans un amas ouvert ou dans les bras spiraux. La distance moyenne entre deux étoiles est de 6 mois-lumière environ alors qu'elle est de 6 à 7 années-lumière dans le voisinage du Soleil.

5.2 Gaz et poussières dans la Galaxie

Environ 1 à 2 % de la matière galactique se présente sous forme de poussières larges de un dixième de millimètre et situées dans les bras spiraux. Cette poussière est soit groupée en nuages opaques comme dans la nébuleuse dite 'Tête de Cheval' dans la constellation d'Orion, soit lumineuse comme dans la célèbre nébuleuse d'Orion, du fait de la proximité d'étoiles chaudes. Les astrophysiciens supposent que certains de ces nuages interstellaires sont des « pouponnières d'étoiles », lesquelles naissent de leur contraction.

LES ÉTOILES ET LA GALAXIE

Les soleils étaient loin, mais ils brillaient toujours.

1. Les étoiles

Les étoiles sont des soleils très éloignés de nous. Elles produisent leur propre lumière, contrairement aux planètes qui ne font que réfléchir celle qu'elles reçoivent du Soleil. Les étoiles scintillent parce que leur lumière traverse les différentes couches de notre atmosphère qui est en continuelle agitation. Sur certaines photographies, on peut voir une croix autour des étoiles, elle est due à la diffusion de la lumière par le support du miroir secondaire du télescope. Cette diffusion, insensible en observation visuelle, se manifeste sur les photographies obtenues après une longue pose.

Dans le ciel, les étoiles forment des constellations dont la plus connue est celle de la Grande Ourse, sans parler de celles du zodiaque qui se trouvent sur le trajet annuel apparent du Soleil. Mais les étoiles d'une même constellation ne sont pas liées physiquement les unes aux autres. Prenons l'exemple de la constellation de Cassiopée, les étoiles qui la composent sont situées à des distances différentes par rapport à nous : l'étoile b se trouve à 47 années-lumière, l'étoile d, elle, est à 96 années-lumière, l'étoile a est située à 160 années-lumière, l'étoile e se trouve à 470 années-lumière, et l'étoile c est à 650 années-lumière.

1.1 La magnitude

On classe les étoiles selon leur brillance apparente, ou leur magnitude apparente.

Magnitude apparente de quelques astres :

Soleil : -27 Véga de la Lyre : 0

Pleine Lune : -13 Antarès du Scorpion : +1

Jupiter : -3 Uranus : +5

Sirius : -1,6 Limite de visibilité à l'oeil nu : +6

L'échelle de magnitude ressemble à un thermomètre renversé. L'éclat est d'autant plus faible que la valeur positive est importante et l'éclat est d'autant plus important que la valeur négative est grande.

Dans cette échelle, une différence de magnitude correspond à un rapport d'éclat de 2,5. Ainsi, une différence de 5 magnitudes correspond à un rapport d'éclat de 2,55, c'est-à-dire 100.

La magnitude absolue est l'éclat des astres considérés comme situés à une même distance de 10 parsecs ou 32,6 années-lumière. Elle permet de connaître l'éclat réel des étoiles.

Magnitude absolue de quelques étoiles :

Antarès : -4,7 Sirius : 1,41

Véga de la Lyre : 0,5 Soleil : 4,83

1.2 Les distances des étoiles

Les distances stellaires sont évaluées en parsecs ou en années-lumière. Une année-lumière correspond au trajet parcouru par la lumière en une année à la vitesse de 299 792, 458 159 219 km.s⁻¹

(P 300 000 km.s⁻¹). Faites le calcul :

1 jour = 60 s x 60 min x 24 h = 86 400 s

1 année-lumière P 300 000 x 365 x 86 400 P 9,46.10¹²km

1 année-lumière P 10 000 milliards de km

Distance de quelques étoiles en années-lumière :

Sirius : 8,8 Véga : 26 Antarès :

424

Le parsec correspond à la distance à laquelle le rayon de

5 La Galaxie

Chaque point est un astre, et chaque astre un soleil.

Toutes les étoiles que l'on voit dans notre ciel appartiennent à notre Galaxie, la Voie Lactée, qui est un gigantesque groupement d'étoiles en forme de disque. Nous la voyons par la tranche. Elle passe par des constellations facilement identifiables : en été, la Lyre, le Cygne, l'Aigle, le Sagittaire et en hiver, Persée, le Cocher, les Gémeaux, le Grand Chien et Orion.

Vue de profil, la Galaxie se présente sous la forme d'un disque renflé au centre appelé « bulbe central » ou « noyau » et elle est entourée d'un halo sphérique d'amas globulaires.

Les dimensions de la Galaxie en années-lumière :

Diamètre : 100 000

Épaisseur du bulbe : 16 000

Épaisseur du disque : 2 000 soit 1/50e du diamètre

Distance du Soleil par rapport au centre : 28 000

Diamètre du halo d'amas globulaires : 150 000 à 200 000

Vue de face, la Galaxie montre trois bras spiraux qui paraissent s'enrouler autour du centre : le bras d'Orion où se trouve le Soleil, le bras du Sagittaire, à 6000 années-lumière de nous en direction du centre galactique, et le bras de Persée à 8000 années-lumière de nous vers l'extérieur. Ces bras spiraux

minimum principal, quand le compagnon d'éclat plus faible passe devant l'étoile principale plus brillante et l'assombrit. L'éclat remonte après l'éclipse et devient maximal quand les deux étoiles sont alignées.

4.2 Les variables pulsantes : les Céphéïdes

D'autres étoiles, parce qu'elles se dilatent et se contractent périodiquement, d'où le qualificatif d'étoiles pulsantes, font varier leur éclat comme si elles cherchaient un équilibre entre l'expansion et la contraction. Les variabilistes observent ces variations d'éclat et établissent des courbes de luminosité. Examinons le cas des Céphéïdes.

L'éclat des Céphéïdes varie d'une magnitude de 0,4 à 1,7 sur une période allant de 1 à 70 jours. Quand l'étoile se contracte, la température s'accroît, d'où une augmentation de l'éclat. Par contre, quand l'étoile se dilate, la température diminue, d'où une diminution de l'éclat.

Le modèle est l'étoile d Céphée dont l'éclat passe de la magnitude 4,1 à la magnitude 5,2 en 5,37 jours, son diamètre passant de 35 diamètres solaires à 32 diamètres solaires.

La luminosité des Céphéïdes est d'autant plus grande que leur période de pulsation est plus longue. Une étoile plus grande, donc plus brillante, a des pulsations plus lentes qu'une étoile plus petite, donc moins brillante, un peu comme un pendule plus long oscille plus lentement. Cette relation entre la période des pulsations et la magnitude absolue des Céphéïdes permet de déterminer leur distance, compte tenu de leur magnitude apparente.

l'orbite terrestre serait vu sous un angle de 1" d'arc (" veut dire seconde).

1 unité astronomique = distance Terre-Soleil = rayon de l'orbite terrestre

1 unité astronomique P 150 millions de km

1 année-lumière P 63 240 unités astronomiques P 0,306 parsec

1 parsec P 206 265 unités astronomiques P 3,262 années-lumière.

Pourquoi le parsec ?

La Terre tourne autour du Soleil : une étoile assez proche paraît effectuer en une année une ellipse qui sera d'autant plus grande que l'étoile sera proche. Deux observations, à six mois d'intervalle, permettent de mesurer le grand axe de cette ellipse. La parallaxe est l'angle sous lequel on voit le demi grand axe de cette ellipse. Quand est égal à 1, l'étoile est à 1 parsec du Soleil. La fraction $1/f$ donne la distance en parsecs si f est exprimé en secondes d'arc. Par exemple, l'étoile la plus proche de nous a une parallaxe égale à 0"76. La distance est alors égale à $1/0,76$, soit 1,3157 parsec (ou 271 382 unités astronomiques ou encore 4,3 années-lumière).

1.3 La couleur des étoiles

Certaines étoiles sont plutôt blanches (ex : Sirius) et d'autres sont rougeâtres (ex : Antarès). Ces couleurs correspondent à la température de la surface des étoiles.

Un prisme restitue les composantes de la lumière dite « blanche » et donne un spectre où chaque couleur correspond à une longueur d'onde et à une température.

Un corps noir absorbe tout le rayonnement qu'il reçoit sans rien restituer (il est noir !). S'il est chaud, il émet dans toute la gamme du spectre, avec un maximum de rayonnement sur la longueur d'onde qui correspond à sa température (Loi de Wien, 1893).

En supposant que les étoiles se comportent comme des corps noirs (ce qui est presque vrai), on peut alors relier la couleur des étoiles à leur température de surface.

Par exemple, pour 1 corps noir porté à 12 000 Kelvin, le rayonnement émis dans le violet est 3 fois plus important que celui émis dans le rouge : l'étoile apparaît violette. Par contre, pour 1 corps noir à 3000 Kelvin, le rayonnement émis dans le rouge est 5 fois plus important que celui émis dans le violet : l'étoile apparaît rouge.

1.4 Le diagramme Hertzsprung-Russell

*

Schématisme moderne du diagramme Hertzsprung-Russell

(Tirée du Cahier de la SAN N°34, "L'homme face aux étoiles" par Daniel Woehrling)

En 1905, les astronomes Ejnar Hertzsprung et Henry Norris Russell ont établi le diagramme qui porte leur nom. En ordonnée, on porte les magnitudes absolues ; en abscisse, les températures et les types spectraux

On remarque une grande concentration d'étoiles sur la diagonale de ce diagramme, cette « séquence principale » correspond au stade de la vie d'une étoile durant lequel elle

4 Les étoiles variables

4.1 Les binaires à éclipses

Dans certains cas, le système d'étoiles doubles se présente par la tranche, si bien que l'étoile compagnon passe devant et derrière l'étoile principale, laquelle est éclipsée partiellement. Cependant, le couple n'est pas résolu à l'oeil nu et seule la variation périodique de l'éclat indique qu'il s'agit d'un couple d'étoiles.

L'étoile type des binaires à éclipses est l'étoile Algol (β Persée), située à 96 années-lumière de la Terre. Les variabilistes, qui étudient les étoiles variables, établissent des courbes de luminosité, lesquelles font apparaître deux minima, dont un

d'un seul effet de perspective. Mais, deux étoiles liées par leur attraction mutuelle forment un couple physique ou système binaire. Les deux étoiles tournent autour de leur centre de gravité commun, qui est plus près de l'étoile la plus massive. Si l'une des étoiles est vraiment très grosse par rapport à l'autre, le centre de gravité du système se situera à l'intérieur de celle-ci. L'étoile compagnon décrit une ellipse autour de l'étoile principale, comme une planète autour du Soleil.

La 3^e Loi de Kepler permet de connaître la masse du système. Cette loi dit que les carrés des périodes de révolution T sont égaux aux cubes des distances moyennes a .

La masse du système provient de la relation : *, si M et m sont les masses des deux étoiles, en masses solaires (a et T respectivement le rayon de l'orbite terrestre et l'année terrestre). Dans le cas du Soleil et d'une planète, * car la masse de la planète est très petite.

Quelques étoiles doubles :

ζ de la Grande Ourse est un couple optique formé des étoiles Mizar, de magnitude 2,3, et d'Alcor, de magnitude 4, séparées par un écart angulaire de 11'50". Mais l'étoile Mizar est un couple physique formé de deux étoiles de magnitude 2,4 et 4 séparées de 14"4. La période de révolution est estimée à 10 000 ans.

Albiréo, ou β du Cygne, est une binaire colorée. L'étoile principale de magnitude 3,1 est de couleur jaune alors que l'étoile compagnon de magnitude 5,3 a une couleur bleue. L'écart angulaire entre les deux est de 34" d'arc. Par contraste, l'étoile compagnon apparaît bleu foncé.

ϵ du Lion est un couple physique de magnitude 2,2 et 3,5 dont l'écart angulaire de 4"3 augmente peu à peu, ce qui indique que l'étoile compagnon se dirige vers le point le plus éloigné de son orbite. La distance entre les deux étoiles est actuellement de 125 unités astronomiques et la période est estimée à 600 ans.

fusionne son hydrogène pour le convertir en hélium. Ce stade est le plus long dans la vie d'une étoile.

On remarque aussi en haut à droite, le groupe des géantes rouges et, en bas à gauche, le groupe des naines blanches. Ces groupes correspondent aux stades ultérieurs de la vie d'une étoile.

1.5 L'analyse spectrale

On peut connaître la composition chimique des étoiles grâce à l'étude de leurs spectres.

Le spectre continu (celui qu'on obtient avec un prisme placé sur le trajet d'un rayon solaire) correspond à la lumière émise par un corps incandescent solide ou fluide.

Un gaz incandescent donne un spectre sombre avec des raies brillantes, dites « raies d'émission » qui correspondent aux composantes de ce gaz.

Un corps incandescent, entouré d'une atmosphère plus froide (ex : une étoile), donne un spectre continu avec des raies sombres dites « raies d'absorption » qui correspondent aux composantes de l'atmosphère. Les raies sont sombres parce que l'atmosphère retient une partie du rayonnement du noyau incandescent. Ces raies sombres ont été mises en évidence dans le spectre solaire par Fraunhofer en 1814.

Les travaux de R. W. Bunsen et de G. R. Kirchhof en 1859 ont établi les bases de l'analyse spectrale, c'est-à-dire la détermination de la composition chimique des atmosphères stellaires en fonction de leurs spectres.

1.6 Les dimensions des étoiles

Vues dans un télescope, les étoiles devraient rester ponctuelles, quel que soit le grossissement, parce qu'elles sont « infiniment » loin de nous. En fait, elles apparaissent comme des taches à cause du scintillement qui étale leur lumière. Un autre phénomène intervient aussi : la diffraction. Quand une source ponctuelle de lumière passe à travers une petite ouverture, comme celle de la pupille de l'oeil, la lumière est étalée, les bords de l'ouverture diffusent la lumière qu'ils reçoivent, si bien

que l'image n'est plus ponctuelle.

Le diamètre des étoiles se déduit de leur luminosité absolue et de leur température de surface. à température de surface égale, la quantité de lumière émise dans l'unité de temps (magnitude absolue) croît avec la surface de l'étoile, cette surface augmentant avec le carré du rayon de l'étoile.

Diamètre de quelques étoiles (Soleil = 1) :

Sirius : 1,8

Véga : 4

Antarès : 330

Bételgeuse : 400

2 La vie des étoiles

Tout cela naît, meurt, croît, décroît, se multiplie.

2.1 D'où provient l'énergie des étoiles ?

Nous avons vu que les étoiles produisent la lumière qu'elles émettent. Comment font-elles ? Elles utilisent l'énergie

delà de cet horizon. Le trou noir est une singularité, en ce sens que les quantités physiques (densité, pression, température) y deviennent infinies et perdent leur signification normale.

John Mitchell (1783) et Pierre Simon Laplace (1796) avaient prédit l'existence d'étoiles invisibles en tenant le raisonnement suivant. Pour eux, la lumière est composée de petites particules sensibles à la gravitation, comme n'importe quel objet matériel. Si un objet quitte le sol d'une planète, à une vitesse inférieure à une vitesse, dite vitesse de libération, il retombera sur le sol. Mais, s'il quitte le sol à la vitesse de libération, ou à une vitesse supérieure, il ne retombera pas et quittera définitivement la planète. Pour la Terre, cette vitesse de libération est voisine de 11 km.s⁻¹.

Si la vitesse de libération d'une étoile dépasse la vitesse de la lumière, c'est-à-dire 300 000 km.s⁻¹, la lumière ne pourra pas s'en échapper, l'étoile sera alors invisible. En donnant à l'étoile la densité moyenne du Soleil (1,41 gramme par centimètre cube), la vitesse de libération est égale à la vitesse de la lumière quand l'étoile a un diamètre 500 fois plus grand que celui du Soleil (Mitchell). En donnant à l'étoile la densité moyenne de la Terre, 4 fois plus importante, le diamètre nécessaire sera 250 fois plus important que celui du Soleil (Laplace).

3 Les étoiles doubles

Deux étoiles qui se forment sur la même ligne de visée par rapport à l'observateur forment un couple optique si cela résulte

carré du rayon de l'étoile. La gravité à l'intérieur du noyau est si importante que les électrons ne peuvent plus empêcher la contraction du noyau : les électrons (de charge électrique négative) pénètrent dans les noyaux atomiques et y neutralisent les protons (de charge positive) qui deviennent des neutrons (de charge nulle). Nous avons affaire à une étoile à neutrons, dont le diamètre n'excède pas quinze kilomètres alors que la densité s'y élève à 1015 grammes par centimètre cube.

On peut se représenter cela de la manière suivante :

Diamètre d'un atome : 10-10 mètres

Diamètre d'un proton : 10-15 mètres

Le proton est donc 100 000 fois plus petit que l'atome.

Diamètre du Soleil : 1 400 000 km

Contractez 100 000 fois le Soleil et vous obtiendrez une sphère de 14 km de diamètre environ.

Les pulsars sont des étoiles à neutrons qui émettent un faisceau d'ondes radio tout comme un phare émet un faisceau de lumière. Si la Terre se trouve sur le trajet de ce faisceau, on capte alors un signal dont la période, très brève, correspond à la période de rotation de l'étoile sur elle-même. Cette période est toujours inférieure à 4 secondes (le pulsar du Crabe fait 33 tours par seconde).

3e cas : le noyau résiduel a une masse supérieure à 3 masses solaires

Dans ce cas, les neutrons ne peuvent résister à la contraction, qui se poursuit au-delà de la phase de l'étoile à neutrons. L'effondrement aboutit au stade du trou noir.

Dans la théorie de la gravitation développée par Einstein, la lumière est déviée quand elle passe à proximité d'un astre massif. De même, la trajectoire d'un rayon issu de l'étoile sera incurvée si l'attraction de l'étoile est très importante. Il existe une limite appelée rayon de Schwarzschild à l'intérieur de laquelle la déviation des rayons lumineux issus de l'étoile est telle qu'ils ne peuvent plus s'en échapper : l'étoile devient alors invisible. Il se forme un horizon. Tout ce qui pénètre à l'intérieur de cet horizon devient invisible et inaccessible pour un observateur placé au-

nucléaire. Dans cette alchimie naturelle, 4 noyaux d'hydrogène fusionnent pour donner un noyau d'hélium, plus de l'énergie. Cette énergie est la différence entre la somme des masses des 4 noyaux d'hydrogène et la masse du noyau d'hélium, qui est un peu plus petite. Dans le Soleil, à chaque seconde, 594 millions de tonnes d'hydrogène sont convertis en 590 millions de tonnes d'hélium : la différence de 4 millions de tonnes est rayonnée lors de la fusion des atomes. C'est le principe de l'équivalence entre la masse et l'énergie ($E = mc^2$) énoncé par Albert Einstein. Ce phénomène de fusion est celui utilisé dans l'explosion des bombes H.

Une étoile est une masse de gaz en équilibre entre deux forces. La première, la force de gravitation, par laquelle l'étoile tend à se contracter (les différentes couches "pèsent" les unes sur les autres). La seconde, la pression, due à la poussée du gaz qui s'échauffe car les particules qui le composent s'entrechoquent et se repoussent violemment.

La poussée du gaz exercée vers l'extérieur empêche les couches de l'étoile de s'effondrer les unes sur les autres. La gravitation empêche l'étoile d'éclater sous la poussée du gaz. Tant que l'étoile convertit son hydrogène en hélium, ces deux forces s'équilibrent.

2.2L'évolution stellaire

Les étoiles naissent, vivent et meurent.

Un grand nuage interstellaire, composé de gaz et de poussières, se contracte jusqu'à ce que la température dans son cœur atteigne 10 millions de degrés. Alors commence la fusion de l'hydrogène en hélium : l'étoile est en équilibre et se situe sur la séquence principale du diagramme Hertzsprung-Russell. Une étoile y restera d'autant plus longtemps qu'elle est petite.

*Quand l'hydrogène s'épuise, le rayonnement faiblit et l'étoile se contracte jusqu'à ce que sa température atteigne 100 millions de degrés, aboutissant à un nouvel équilibre. Alors commence la fusion de l'hélium en carbone. Quand tout l'hélium est consommé, l'étoile se contracte à nouveau jusqu'à la

température de fusion du carbone. Et ainsi de suite, tous les éléments jusqu'au fer sont ainsi synthétisés à l'intérieur des étoiles.

Durée de la fusion des éléments pour une étoile de 25 masses solaires :

Hydrogène	7 millions d'années
Hélium	500 000 ans
Carbone	600 ans
Néon	1 an
Oxygène	6 mois
Silicium	1 jour

Chaque phase dure de moins en moins longtemps. L'étoile se structure en couches concentriques : le noyau de fer est entouré par les couches de silicium, de magnésium, de néon, d'oxygène, de carbone et d'hélium.

2.3 Le destin des étoiles

Le soleil était là qui mourrait dans l'abîme.

Il arrive un moment où le déséquilibre est tel que l'étoile expulse ses couches extérieures et laisse son noyau à nu. Le destin de l'étoile dépend alors de la masse résiduelle de son noyau.

1er cas : le noyau résiduel a une masse inférieure ou égale à 1,4 masse solaire

Quand l'hydrogène s'épuise, l'étoile se contracte jusqu'à ce que sa température atteigne 100 millions de degrés, comme nous venons de le dire. Une plus grande quantité de chaleur parvient à la surface de l'étoile qui se dilate alors que son noyau se contracte. La surface de l'étoile plus grande, est plus froide

(3000 Kelvin) et prend alors la couleur rouge, devenant ainsi une « géante rouge » (en haut à droite du diagramme Hertzsprung-Russell).

Ensuite, l'étoile expulse son enveloppe qui se dilate de plus en plus. On l'observe sous la forme d'une « nébuleuse

planétaire » comme la célèbre nébuleuse de la Lyre (n° 57 du catalogue de Messier). Cette nébuleuse se disperse petit à petit dans l'espace.

Le noyau se contracte pour devenir une « naine blanche ». À l'intérieur de celle-ci, le gaz est comprimé à tel point que les atomes se touchent. Leurs électrons se repoussent et interdisent aux atomes de pénétrer les uns dans les autres, empêchant donc le noyau de se contracter davantage.

Le diamètre d'une naine blanche ne dépasse pas 10 000 kilomètres, c'est-à-dire qu'elle renferme une masse comparable à celle du Soleil dans une sphère pas plus grosse que la Terre, ce qui porte sa densité à une valeur voisine de la tonne par centimètre cube.

Tel est le destin des étoiles moyennes comme notre Soleil. Dans 4 à 5 milliards d'années, le Soleil deviendra une géante rouge avant de terminer sa vie sous la forme d'une naine blanche.

2e cas : le noyau résiduel a une masse comprise entre 1,4 et 3 masses solaires

Les grosses étoiles synthétisent tous les éléments jusqu'au fer, après quoi elles explosent en supernovae. Le noyau se contracte alors que l'enveloppe est projetée dans l'espace (la nébuleuse du Crabe provient de l'explosion d'une supernova observée par les Chinois en 1054). La température dans l'enveloppe est si élevée que tous les éléments plus lourds que le fer y sont synthétisés en quelques secondes. La dispersion de cette enveloppe enrichit le milieu interstellaire en éléments lourds.

Quelques supernovae sont restées célèbres : celle de 1572 observée par Tycho Brahé, celle de 1604 observée par Kepler et celle de 1987 observée par les grands observatoires de l'hémisphère sud.

Le noyau se contracte davantage que dans le cas d'une naine blanche. Un objet sphérique comme une étoile, attire comme si toute sa masse était concentrée en son centre. Quand l'étoile se contracte, sa masse reste la même alors que son rayon diminue. L'intensité de la pesanteur augmente à proportion du