

Naines blanches, étoiles à neutrons et étoiles étranges

Les états exotiques de la matière dans les corps hyperdenses

Nicolas BELLEMONT et Théo TURLIN

Copyright © 2013 John Smith

PUBLISHED BY PUBLISHER

BOOK-WEBSITE.COM

Licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License (the "License"). You may not use this file except in compliance with the License. You may obtain a copy of the License at <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>. Unless required by applicable law or agreed to in writing, software distributed under the License is distributed on an "AS IS" BASIS, WITHOUT WARRANTIES OR CONDITIONS OF ANY KIND, either express or implied. See the License for the specific language governing permissions and limitations under the License.

First printing, March 2013

Table des matières

1	Quelques notions d'astronomie	5
1.1	Le cycle de la matière	5
1.2	Les naines blanches	6
1.2.1	Nébuleuse planétaire	6
1.2.2	Quelques caractéristiques des naines blanches	7
1.3	Les étoiles à neutrons	7
1.3.1	Supernovae	7
1.3.2	Caractéristique d'une étoile à neutrons	8
2	Les états exotiques de la matière	11
2.1	Théorie des naines blanches	11
2.1.1	Gaz dégénéré...	11
2.1.2	... d'électrons relativistes	12
2.2	Étoiles à neutrons	13
2.2.1	Détermination de la pression gravitationnelle et de la pression de dégénérescence	
	13	
2.2.2	Condition d'équilibre d'une étoile à neutron et relation rayon-masse	14
	Bibliographie	15
	Sites web	15

1. Quelques notions d'astronomie ...

1.1 Le cycle de la matière

On appelle *Cycle de la matière galactique* les différentes étapes et états par lesquels transite la matière telle que nous la connaissons. C'est par ce cycle que notre univers s'enrichit en éléments lourd et que les étoiles ainsi que tous les objets visible sont créé, il va être question dans cette première partie de décrire ces différentes étapes et de mieux comprendre comment évolue la matière au sein de notre univers.

Nous allons prendre comme point de départ de notre cycle le **milieu interstellaire**, il à une masse d'environ $5 \cdot 10^9 M_{\odot}$ et est constitué aux trois quart d'hydrogène, d'hélium à niveau d'un quart et que poussière pour ce qui est des dixième de pourcent restant (il constitue le réservoir de matière de notre univers). On considère que dans ce milieu la densité est environ d'une particule par cm^3 , bien que cela soit extrêmement faible, certaines régions sont plus densément peuplée que d'autres a cela on rajoute l'hydrodynamique, l'auto gravité... on observe sur des périodes de temps assez faibles (quelques millions d'année) l'apparition de nuage moléculaire.

Ces nuages forment le milieu interstellaire **dense**, sa masse reste de l'ordre de $10^9 M_{odot}$ mais sa composition à évolué pour être constitué à environ 75% de dihydrogène (d'où le nom de nuage moléculaire). C'est à partir de ce moment que les choses vont s'emballer, les zones les plus denses des nuages vont attirer plus de matière à eux entraînant une augmentation de la densité etc... jusqu'à ce que l'instabilité gravitationnelle soit trop forte et que le nuage s'effondre sur lui même.

Il résulte de cet effondrement, la formation d'une **Proto-étoile**. Durant cette phase qui va durer quelques centaines de milliers d'années, la matière va continuer à tourner s'agglomérer autour du centre de gravité. Au fur et à mesurer de ce processus la proto-étoile va voir sa température augmenter, les particules du gaz vont s'échauffer continuellement jusqu'à atteindre une température critique qui permettra "l'allumage" de la réaction de fusion de l'hydrogène (plusieurs million de Kelvins), une **Étoile** est née.

Le cycle de vie d'une étoile est assez complexe, pour simplifier nous dirons que l'étoile fusionne de l'hydrogène en son sein et que cette réaction et à l'origine de la pression interne de l'étoile, pression qui vient compenser la force de gravité qui tend à faire s'effondrer l'étoile sur elle-même.

Une fois que l'étoile à épuiser tout son hydrogène, la gravité va reprendre le dessus faire s'effondrer l'étoile, augmenter la pression et la température, réunissant les conditions pour fusionner l'hélium, stoppant effondrement etc...¹.

Le cycle de vie d'une étoile est représenté par un diagramme HR (*Hertzsprung-Russel*) qui permet de voir l'évolution d'une étoile le long de la séquence principale (où elle passera le plus clair de son existence) mais également de savoir quel objet astronomique il résultera de sa mort.

Une fois que l'étoile aura épuisé tout son carburant elle "mourra" soit en passant par la **Nébuleuse planétaire** soit en **Supernovæ** si l'étoile était suffisamment massive.

Ces deux phénomènes permettent de rendre au milieu interstellaire un grand nombre de nouvelles particules, enrichissant de manière considérable celui-ci et permettant l'apparition future d'objet céleste plus complexe en terme de composition.

Nous rentrerons plus en détails sur les phénomènes de Nébuleuse planétaire et de Supernovæ dans les parties consacrées aux **Étoiles à neutron** et aux **Naines blanches**, car nous verrons que dans la plupart des cas² Ces objets sont le résultats des Nébuleuses et des Supernovæ.

1.2 Les naines blanches

1.2.1 Nébuleuse planétaire

Comme dit précédemment nous allons revenir sur le phénomène de Nébuleuse planétaire qui donne naissance à la plupart des naines blanches de l'Univers.

Pour commencer il faut savoir qu'une manière de classer les étoiles consiste à les ordonner selon leurs masses, et donc on estime que seuls les étoiles de masse moyenne (C.à.D de moins de $10M_{\odot}$) donnent naissance à des Naines blanches. Le processus qui mène à la création d'une telle étoile est le suivant.

Tout d'abord comme nous l'avons vu dans notre introduction, une étoile va fusionner son hydrogène en hélium³

A partir de ce moment, la gravitation redevient alors la force dominante et l'étoile s'effondre sur elle-même, les nouvelles conditions de pression et de température permettent la fusion de l'hélium⁴ cette fusion produit principalement du carbone et de l'oxygène et dégage une importante quantité d'énergie qui ne se contente plus de contrebalancer l'effondrement gravitationnel mais qui fait gonfler l'étoile de manière impressionnante⁵ la transformant ainsi en géante rouge.

Les réserves d'hélium s'épuisant relativement vite, l'effondrement de l'étoile reprend assez vite, malheureusement pour la plupart des étoiles cet effondrement n'engendre pas une pression et une température suffisante pour amorcer le processus de fusion du carbone laissant l'étoile se réduire à un noyau solide de carbone et d'oxygène. Les couches externes de l'étoile vont alors "rebondir" sur ce noyau. En réalité, le phénomène est plus complexe que ça et c'est par la pression de radiation que ces couches vont se faire souffler lors de la violente contraction du cœur de l'étoile.

Ce nuage de particules va donc lentement (à l'échelle de l'univers, en réalité ce nuage se déplace

1. Ce processus s'arrête au fer car aucune étoile ne peut fusionner le fer, en effet la fusion post fer consomme de l'énergie la ou la fusion pré fer en produisait.

2. La réalité astrophysique est bien plus complexe que cela et la manière de former certains objets de notre univers peut être assez exotique.

3. On a généralement deux moyens d'y parvenir, soit par cycle proton-proton qui va par le biais du deutérium et du tritium/hélium 3 va donner de l'hélium 4, soit par le cycle CN0

4. Par un procédé appelé réaction triple alpha lorsque que la température aura atteint les $10^8 K$

5. On considère que lorsque le soleil entrera dans sa phase de géante rouge, sa taille aura tellement augmenté qu'il atteindra l'orbite de la Terre.

$100\,000\ km/h$) se faire expulser allant ainsi alimenter le milieu interstellaire en élément plus riche, c'est la nébuleuse planétaire. Il ne reste plus alors que le noyau au centre de cet immense nuage et c'est ce "noyau" qui constitue la naine blanche.

1.2.2 Quelques caractéristiques des naines blanches

Une des premières naines blanches à avoir été observées est Sirius B, compagnon de l'étoile Sirius de la constellation du grand chien, qui avait remarqué en 1844 une anomalie dans la manière dont se déplaçait Sirius. Il fut imaginé que cette anomalie pouvait être due à un compagnon encore invisible jusqu'alors. Quelques années plus tard, en 1862, on réussit à observer Sirius B et à se rendre compte que cette étoile est bien une naine blanche.

Bien que leurs tailles et leurs masses soient relativement variées, pour ce cours nous ferons l'approximation (partagée par la communauté scientifique) qu'une naine blanche est un objet de la masse du Soleil contenu dans un volume semblable à la Terre,

$$R \simeq 5000\text{ km} \quad M \simeq 10^{30}\text{ kg} \quad \rho \simeq 5 \cdot 10^6\text{ g/cm}^3$$

on note qu'elle figure parmi les objets les plus denses de l'univers. La température au sein de ces monstres est de l'ordre de 10^7 K et le cœur de la naine blanche, comme nous l'avons dit un peu plus haut, n'est plus constitué que des restes des réactions nucléaires, c'est à dire principalement de l'oxygène et du carbone, plus précisément d'un plasma constitué de noyaux d'oxygène et d'électrons.

1.3 Les étoiles à neutrons

1.3.1 Supernovae



FIGURE 1.1 – SN 1994D est une supernova de type Ia en train de briller en dehors de sa galaxie mère, NCG 4526.

Credits : NASA

Il existe deux principaux phénomènes menant à une supernova, que sont l'explosion thermonucléaire d'une naine blanche, appelée supernova de type Ia, et l'effondrement du cœur, appelée supernova de type Ib, Ic ou II suivant la composition de l'étoile. [1]

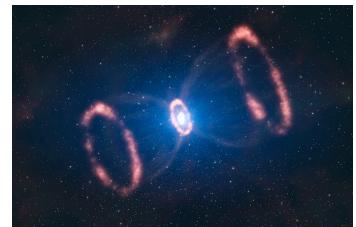


FIGURE 1.2 – Représentation d'artiste de SN 1987A.
Crédits : ESO

Supernova par explosion thermonucléaire (3)(4)

Ce type de réaction ne peut s'initier que dans un système binaire, composé d'une naine blanche et d'une autre étoile, suffisamment compact pour que l'étoile puisse déverser du gaz sur la naine blanche. L'explosion est amorcée par effondrement gravitationnel de celle-ci. Les réactions nucléaires démarrent et ne prennent que quelques instants, créant des éléments allant jusqu'au nickel. Sous la pression thermique créée par la naine blanche, les couches supérieures sont soufflées, ce qui lève la dégénérescence des couches de la naine blanche, qui sont à leur tour soufflées. Dans ce procédé, l'étoile est complètement désintégrée.

Supernova à effondrement de cœur (2)(5)

Ce type de supernova concerne les étoiles dont la masse est comprise entre $10M_{\odot}$ et $40M_{\odot}$, au-delà de cette masse critique, une étoile est supposé s'effondrée directement en un trou noir. Pour pouvoir exploser en supernova, une étoile massive doit fusionner tous ses éléments jusqu'au fer, qui est un élément inerte.

- Un élément inerte est un élément dont on ne peut extraire de l'énergie ni par fusion, ni par fusion

Une fois le cœur de fer créé, le cycle de la supernova s'enclenche. Tout d'abord, le cœur de fer s'effondre sur lui-même, entraînant de par le fait une augmentation de sa température et de sa densité, ce qui favorise les captures électroniques. Les électrons vont réagir avec les protons des atomes de fer et former des neutrons et des neutrinos. La diminution du nombre d'électrons entraîne une diminution de la pression de dégénérescence des électrons dans le cœur de l'étoile.

Définition 1.3.1 — Pression de dégénérescence. On appelle pression de dégénérescence la pression à partir de laquelle la matière se comporte comme un gaz et où la force nucléaire forte empêche sa densité d'augmenter.

À ce moment, la gravitation du cœur l'emporte sur la pression de dégénérescence, et il s'effondre sur lui-même, quasiment en chute libre jusqu'à ce que les captures électroniques se terminent, que toute la matière soit transformée en neutrons et que la densité soit de l'ordre de $10^{17} \text{ kg.m}^{-3}$. Le cœur continue de s'effondrer jusqu'à atteindre la densité atomique, soit environ $2 \cdot 10^5 \text{ kg.m}^{-3}$. Cet effondrement se fait à une vitesse moyenne de $70\,000 \text{ km.s}^{-1} \simeq 0.23c$. À ce moment, le cœur ne mesure que quelques kilomètres de diamètre.

La vitesse de l'effondrement est telle que les couches externes de l'étoile n'ont pas le temps de "suivre" le cœur, ce qui crée une zone de vide entre celles-ci et le noyau. Les couches externes s'effondrent alors sur le noyau, mais celui-ci ne peut être plus compact. Lorsqu'elles touchent le noyau de neutrons, elles rebondissent alors sur ce dernier, ce qui crée le choc.

Le choc se propage à environ $0.25c$ sur une centaine de kilomètres avant de s'arrêter, son énergie étant consommée par les captures électroniques et la dissociation des atomes de fer, mais les neutrinos émis par les réactions thermonucléaires permettent de faire repartir ce dernier. Il se propage à travers les différentes couches de l'étoile, sa vitesse augmentant à chaque interface, pour atteindre environ $0.5c$ à la surface. Cela éjecte la matière et l'étoile devient alors une supernova.

La luminosité de cette explosion peut atteindre 100 milliards de fois la luminosité solaire, mais cette luminosité ne correspond qu'à 0.01% de l'énergie de la supernova, 99% de celle-ci étant emportée par les neutrinos, ce qui reste est converti en énergie cinétique pour l'objet résultant de cette supernova.

Les objets compacts résultants de cette dernière varie en fonction de la masse de l'étoile de départ. Si cette dernière était comprise entre $8M_{\odot}$ et $15M_{\odot}$, alors le cœur devient une étoile à neutrons, au-delà de cette masse de $15M_{\odot}$, la masse initiale de l'étoile n'est pas suffisante pour déterminer si le résultat sera une étoile à neutrons ou un trou noir.

1.3.2 Caractéristique d'une étoile à neutrons

Ce type d'étoiles à une masse allant de $1.4M_{\odot}$ à $2.16M_{\odot}$ pour un rayon d'une dizaine de kilomètres, elle possède donc une densité de l'ordre de $3 \cdot 10^{26} \text{ kg.m}^{-3}$.

R Une boîte d'allumette en "étoile à neutron" pèse 3 milliards de tonnes

Une fois formée, elle ne produit plus de chaleur. Sa température lors de sa formation atteint les $10^{11}K$ mais elle décroît rapidement pour atteindre 5.10^6K

2. Les états exotiques de la matière

La matière dégénérée est un état particulier de la matière fermionique. Cette état extrêmement dense est composé de particules qui peuplent les états de haute énergie cinétique, afin de satisfaire le principe d'exclusion de Pauli. En effet, ce dernier interdit à deux fermions de se trouver dans le même état quantique. Or lorsque la densité de matière augmente, certaines fonctions d'ondes finissent par se superposer entre différents fermions. La pression de dégénérescence s'applique dès lors que les fonctions d'ondes qui tentent de se superposer concernent deux fermions dans le même état. Cet état de la matière est décrite par un gaz de Fermi.

2.1 Théorie des naines blanches

Nous avons vus que les étoiles de la séquence principales sont en équilibre car les réactions nucléaires qui se produisent dans leurs coeurs permettent de contrebalancer l'effondrement gravitationnel, cependant qu'en est-il des naines blanches ? pendant longtemps les scientifiques se sont posé la question étant donnée que nous savons les naines blanches exemptent de toutes réactions nucléaires en plus d'avoir à subir d'incroyable force de pression gravitationnelle.

Un élément de réponse à été apporter en 1925 par le britannique Ralph Fowler, qui propose d'appliquer les principes de la mécaniques quantiques au gaz d'électrons présent dans le noyau des naines blanches. Ce que propose Fowler c'est que les électron représente en réalité un gaz quantique dégénéré et que ce gaz induit une pression quantique qui vient assurer la stabilité de la naine blanche.

Le but de la partie d'aujourd'hui va être de retrouver ces résultats et de redémontrer qu'effectivement la stabilité d'une naine blanche provient d'une pression quantique induites par un gaz d'électrons dégénéré relativistes.

2.1.1 Gaz dégénéré...

- Pour commencer l'énergie potentielle gravitationnelle d'un corps de masse M et de dimension R vaut $E_g = -G \frac{M^2}{R}$
- Pour se faire une idée de l'intensité de ces force on imagine un accroissement ΔR de l'objet

$$dE_g = G \frac{M^2}{R^2} dR$$

- l'augmentation d'énergie correspond à un travail $\delta W = -dE_g$ avec $dW = P_g dV = P_g 4\pi R^2 dR$
- on obtient au final $P_g \simeq -\frac{G}{4\pi i} \frac{M^2}{R^4} = -\frac{6.67 \cdot 10^{-11}}{4\pi} \frac{M^2}{R^4} = -10^{33} \text{ Pa}$

- Naine blanche rayonne → perte d'énergie et donc refroidissement
- Refroidissement entraîne théoriquement une recombinaisons noyaux/électrons
- Calcul du nombre de noyaux par unité de volume

$$\frac{N}{V} \simeq \frac{\rho}{A} * N_A \simeq 2.10^{29} \text{ cm}^{-3}$$

- En inversant on à le volume dispose disponible pour chaque noyaux 5.10^{-6} A
- Volume occupé par un atome ? 1 million de fois plus grand
- Aucun phénomène physique connu capable de contrebalancer les forces gravitationnelle pour augmenter à ce point le volume.

On s'intéresse à la température de Fermi (température de dégénérescence) du gaz d'électrons

- Même manière de calculer que pendant le cours de physique des matériaux

$$T_F = \frac{\hbar^2}{2m_e K} \left(3\pi^2 \frac{N_e}{V} \right)^{\frac{2}{3}}$$

- Température de Fermi 5.10^9 K
- Avec $\frac{N_e}{V} \simeq \frac{\rho}{A} * Z * N_A = 1.5 \cdot 10^{30} \text{ cm}^{-3}$
- Température du gaz d'électron bien en deçà de la température de Fermi → Gaz d'électron totalement dégénérée.
- Pression d'un gaz de fermions dégénérée

$$\frac{2}{15\pi^2 \hbar^3} (2m_e)^{\frac{3}{2}} (kT_f)^{\frac{5}{2}}$$

$$\hbar = 1.054 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$$

- Pression du gaz d'électrons $\simeq 10^{22} \text{ Pa}$
- On voit qu'un gaz d'électron dégénérée ne suffit pas à expliquer la stabilité de la naine blanche, la pression n'est pas assez forte.

2.1.2 ... d'électrons relativistes

- Toujours par rapport au cours de matériaux on à les énergie mises en jeu qui valent $E = k * T_F \simeq 10^5 \text{ eV}$
- Les électrons sont relativistes : $E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$
- On en profite pour calculer l'impulsion de Fermi $\sqrt{\frac{E^2 - m^2 c^4}{c^2}} = 3.3 \cdot 10^{-4}$
- travailler avec des formules relativistes de gaz dégénérée afin de trouver la condition d'équilibre de la naine blanche.
- On peut montrer que la pression d'un gaz relativiste est donnée par $P = \frac{J}{V}$ avec J le grand potentiel (potentiel de la distribution micro canonique).
- Les formules sont assez complexe et assommantes, mais pour des gaz ou le gaz est complètement dégénérée (température très faible devant la température de Fermi), le grand potentiel s'écrit :

$$J = -\frac{V}{3\pi^2 \hbar^3} \int_0^{p_F} p^3 \frac{dE}{dp} dp$$

— La pression des particules relativiste s'écrit donc

$$P = \frac{c^2}{3\pi^2\hbar^3} \int_0^{p_F} \frac{p^4}{\sqrt{p^2c^2 + m^2c^4}} dp$$

— on pose le chgt de variable $x = \frac{p}{mc}$

$$\begin{aligned} P &= \frac{c^2}{3\pi^2\hbar^3} \int_0^{x_F} \frac{x^4 m^4 c^4}{\sqrt{x^2 m^2 c^4 + m^2 c^4}} mc dx \\ &= \frac{c^2}{3\pi^2\hbar^3} \int_0^{x_F} \frac{x^4 m^5 c^5}{\sqrt{m^2 c^4 (x^2 + 1)}} dx \\ &= \frac{m^4 c^5}{3\pi^2\hbar^3} \int_0^{x_F} \frac{x^4}{\sqrt{x^2 + 1}} \\ &= \boxed{\frac{c}{12\pi^2\hbar^3 p_F^4} \left[1 - \frac{m^2 c^2}{p_F^2} \right]} \end{aligned}$$

— On calcule et on obtient une pression pour le gaz dégénérée d'électron relativiste de $10^{36} Pa$
Au arrondi près et au erreurs de calculs, on trouve une pression bien supérieur à celle du seuls gaz d'électrons dégénérée et ont voit bien que cette pression est suffisante pour permettre de contrebalancer la pression gravitationnelle et maintenir la naine blanche en équilibre.

2.2 Étoiles à neutrons

2.2.1 Détermination de la pression gravitationnelle et de la pression de dégénérence

La stabilité d'une étoile résulte de l'équilibre entre les forces gravitationnelles qui tendent à compresser l'étoile et la pression du gaz constituant cette dernière qui tend à s'étendre dans tout l'espace disponible du fait de sa pression. L'effondrement de l'étoile sur elle-même s'arrête quand les processus physiques internes (transformation d'un couple proton-électron en un neutron) créent une pression suffisante pour compenser les forces gravitationnelles. Afin de comparer les deux phénomènes, nous allons calculer une "pression gravitationnelle". Cette pression gravitationnelle s'obtient de la manière suivante :

$$\begin{aligned} P_G &= \frac{F}{S} \\ &= \frac{-\frac{GM^2}{R^2}}{4\pi R^2} \\ &= -\frac{G M^2}{4\pi R^4} \end{aligned}$$

Une chose importante à constater est que cette pression est négative, cela traduit le fait que la pression gravitationnelle tend à compresser le système.

Nous allons désormais calculer la température de Fermi du gaz de neutron. Pour cela nous allons avoir besoin du rapport $\frac{N}{V}$

$$\frac{N}{V} = \frac{\frac{M}{m_n}}{\frac{4}{3}\pi R^3} = \frac{3M}{4m_n\pi R^3}$$

Nous pouvons donc maintenant calculer la température de Fermi de l'étoile

$$\begin{aligned} T_F &= \frac{E_F}{k_B} \\ &= \frac{\hbar^2}{2k_B m_n} \left(3\pi^2 \frac{N}{V} \right)^{\frac{3}{2}} \\ &\simeq 10^{10} K \end{aligned}$$

On constate que celle-ci est légèrement inférieure à celle de l'étoile lors de sa formation, mais qu'elle devient rapidement beaucoup plus grande que cette dernière, puisque l'étoile refroidit très vite 1.3.2. Une fois l'étoile stabilisée, le rapport $\frac{T}{T_F}$ est très inférieur à 1, donc le gaz de neutron est totalement dégénéré. Or la pression d'un gaz de fermions dégénéré tend vers une limite non-nulle lorsque T devient très inférieure à T_F .

La formule pour la pression de dégénérence d'un gaz de neutron est

$$P_0 = \frac{2\hbar^2}{m_n} \left(\frac{\rho}{m_n} \right)^{\frac{5}{3}}$$

2.2.2 Condition d'équilibre d'une étoile à neutron et relation rayon-masse

Pour que l'étoile soit en équilibre les deux pressions doivent se compenser.

$$\begin{aligned} P_0 + P_G &= 0 \\ \frac{2\hbar^2}{m_n} \left(\frac{3M}{4\pi R^3} \right)^{\frac{5}{3}} &= \frac{G M^2}{4\pi R^4} \\ \frac{2\hbar^2}{4\pi^2 m_n} \left(\frac{3M}{4\pi} \right)^{\frac{5}{3}} \frac{1}{R^5} &= \frac{G M^2}{4\pi R^4} \\ \frac{2\hbar^2}{\pi m_n} \left(\frac{3}{4\pi} \right)^{\frac{5}{3}} \frac{M^{\frac{5}{3}}}{GM^2} &= R \\ R &= \frac{4\hbar^2}{Gm_n} \left(\frac{3}{4\pi} \right)^{\frac{5}{3}} \frac{1}{M^{\frac{1}{3}}} \end{aligned}$$

On peut réécrire cette condition sous la forme $RM^{\frac{1}{3}} = cst$. Nous obtenons donc une relation simple entre le rayon d'une étoile à neutrons et sa masse.

Bibliographie

Sites web

- [1] *Supernova*. <https://en.wikipedia.org/wiki/Supernova>. Accédé le 29 Novembre 2018 (cf. page 7).
- [2] *Supernova à effondrement de cœur*. https://fr.wikipedia.org/wiki/Supernova_à_effondrement_de_cœur. Accédé le 29 Novembre 2018 (cf. page 8).
- [3] *Supernova thermonucléaire*. https://fr.wikipedia.org/wiki/Supernova_thermonucléaire. Accédé le 29 Novembre 2018 (cf. page 7).
- [4] *Type Ia supernova*. https://en.wikipedia.org/wiki/Type_Ia_supernova. Accédé le 29 Novembre 2018 (cf. page 7).
- [5] *Type II supernova*. https://en.wikipedia.org/wiki/Type_II_supernova. Accédé le 29 Novembre 2018 (cf. page 8).

