

## Les objets exotiques

Parmi les nombreux objets qui peuplent l'Univers, certains présentent des caractéristiques étonnantes, bien souvent encore mystérieuses. Catalogués dans le domaine exotique, ces objets ont pour nom, naines blanches, étoiles à neutrons, novae, pulsars, trous noirs ou encore sursauts gamma.

### Les naines blanches

Quand tout le combustible nucléaire est consommé, une étoile semblable au Soleil se contracte spontanément sous l'effet de la gravitation au point de se transformer en une petite sphère blanche de la dimension d'une petite planète (1500 à 50000 km de diamètre). Poussée par le rayonnement stellaire général, l'enveloppe extérieure du cœur de l'étoile s'évapore dans l'espace, le plasma et les gaz neutres prenant la forme d'une nébuleuse planétaire. Messier 57, la célèbre nébuleuse annulaire de la constellation de la Lyre est l'illustration typique de ce processus. La petite étoile située au centre de la nébuleuse est le cœur d'une ancienne étoile géante qui a perdu son atmosphère que l'on découvre aujourd'hui sous la forme de cet anneau multicolore. Elle est devenue une étoile naine blanche qui lentement se refroidit et disparaîtra totalement à nos regards dans quelques milliards d'années, ne laissant derrière elle qu'un halo nébuleux de gaz chaud qui se refroidira et s'assombriera progressivement, seule trace réminiscente de son passé glorieux.

Tel est l'avenir de notre Soleil et de la majorité des autres étoiles. De la majorité d'entre elles, car même les étoiles plus massives que le Soleil - entre 6 et 10  $M_{\odot}$  sur la Séquence principale - perdront la plus grande partie de leur atmosphère dans l'espace à la fin de leur vie et deviendront des étoiles naines sans avoir explosé au préalable. Selon les calculs de l'astronome indien Subrahmanyan Chandrasekhar toutes les étoiles naines ont une masse nucléaire maximale d'environ 1.4  $M_{\odot}$ .



Si l'étoile est plus massive (plus de  $10 M_{\odot}$  environ sur la Séquence principale ou plus de  $1.4 M_{\odot}$  dans le noyau en fin de cycle), l'étoile franchit la limite de Chandrasekhar : en vertu des relations d'incertitudes de Heisenberg et sous le poids engendré par la gravitation, les électrons libres du noyau s'infiltrèrent parmi les cendres nucléaires et y déclenchent une réaction de fusion qui conduira à former un noyau d'O-Ne-Mg ou de fer. L'arrêt brutal des réactions de nucléosynthèses permet finalement aux électrons libres de convertir les protons en neutrons et de transformer le corps céleste en étoile neutron, en pulsar ou en trou noir, des entités plus étonnantes encore.

Malgré la rigueur de cette évolution, les astrophysiciens nous rappellent qu'il reste des incertitudes quant au nombre d'électrons par baryon dans le noyau d'une telle étoile ce qui peut rendre la solution de l'équation de Chandrasekhar plus instable. S'ajoute le fait que le profil de l'entropie et la pression coulombienne dans le noyau renormalisent certains facteurs, conduisant à modifier la masse de Chandrasekhar, si bien qu'aujourd'hui encore la masse critique peut varier entre  $1.2 M_{\odot}$  et  $2.0 M_{\odot}$ .

Dans une étoile naine, les réactions thermodynamiques sont inertes. Elles sont remplacées par des phénomènes relativistes et quantiques. Autrement dit, dans ce type d'étoiles les réactions chimiques sont interrompues, se sont des astres "froids" qu'il est possible de modéliser sur base d'une température nulle.

En 1932 le physicien soviétique Lev Davidovitch Landau démontra que dans une étoile naine l'effondrement atomique était arrêté par les forces de répulsions nucléaires. Resserrés jusqu'à la dégénérescence, les atomes sont détruits car les électrons ont repris leur liberté. Cette matière qui n'est ni un gaz ni un plasma offre une "pression de dégénérescence" ou "pression de Fermi" qui obéit au principe d'exclusion de Pauli. Cette pression qui ne s'explique qu'en termes quantiques empêche la force de la gravitation d'agir. Les nucléons sont comprimés les uns sur les autres, la densité pouvant atteindre la folle valeur de 1000 tonnes par  $\text{cm}^3$ , avec une moyenne d'un million de fois la densité de la Terre ! La valeur exacte est encore largement débattue mais oscille entre  $10^4$  et  $10^9 \text{ g/cm}^3$  !

En raison de leur gravité de surface hors du commun qui peut atteindre 100000 fois celle de la Terre, les astrophysiciens pensent que la surface des étoiles naines est également très particulière. Elle pourrait former une épaisse croûte de 50 km d'épaisseur constituée en surface de matière ordinaire mais en profondeur d'un réseau cristallin d'atomes de carbone et d'oxygène, une structure très étrange qui rappelle... le diamant !

Il fallut quelques années pour confirmer cette théorie, mais en 2004 l'astronome Travis Metcalfe et son équipe du Centre d'Astrophysique Harvard-Smithsonian découvrirent à 50 années-lumière dans la constellation du Centaure une étoile naine blanche dont le noyau était cristallin et vraisemblablement constitué d'un gigantesque diamant de 1500 km de diamètre ! Imaginez les carats que cela doit représenter... De Beers et bon nombre d'entre nous y effectueraient bien quelques forages !

Baptisée "Lucy" en hommage à la célèbre chanson des Beatles "Lucy in the Sky", cette étonnante étoile naine cataloguée BPM 37093 ne fait pas que briller mais elle résonne également comme un gigantesque gong soumis à des pulsations régulières. C'est en analysant

---

ces pulsations que Metcliffe et son équipe ont pu étudier l'intérieure de l'étoile, de la même manière que les géologues utilisent les séismographes pour étudier la constitution interne de la Terre.

Constituée du coeur d'étoiles géantes, la température centrale d'une étoile naine demeure extrêmement élevée. Dépendant de l'agitation des noyaux, elle peut atteindre 100 millions de degrés en début de cycle. En surface en revanche la température avoisine en général les 10000 K mais peut occasionnellement être dix fois supérieure. Les étoiles naines se refroidissent rapidement, au moins en termes astronomiques, raison pour laquelle assez peu d'étoiles naines ont été découvertes, tout au plus un millier d'objets.

Au début de leur vie les étoiles naines brillent d'un éclat bleu-blanc mais sans émotion : ni la chaleur ni le froid ne les font réagir, que du contraire. Une étoile naine n'a plus aucun moyen de conserver sa chaleur à moins d'accréter la matière d'une étoile proche. Ainsi si elle forme un couple avec une étoile géante, celle-ci perdra une partie des couches supérieures de son atmosphère au profit de l'étoile naine qui verra son atmosphère se remplir d'hydrogène. L'étoile naine se transformera alors en une étoile variable cataclysmique qui peut évoluer en nova suite à l'explosion de l'enveloppe d'hydrogène.

L'atmosphère d'une étoile naine prend un aspect très étrange qui n'a plus rien à voir avec une atmosphère ordinaire. Si les éléments les plus lourds comme le carbone sont cloués sur la surface de l'étoile en raison de la gravité, dans une étoile naine de 10000 K les éléments plus légers ne peuvent pas non plus s'en échapper. Seul l'hydrogène ou l'hélium, les deux éléments les plus légers s'échappent dans l'atmosphère, ou ce qui convient d'appeler une atmosphère car étant donné la force de gravité qui y règne son épaisseur ne dépasse pas quelques centaines de mètres !

Mais grâce à un échantillonnage qui se complète chaque année, si on suit les modèles théoriques on constate que toutes les étoiles naines ayant une atmosphère d'hydrogène portée à plus de 55000 K et rayonnant en ultraviolet présentent une atmosphère qui s'opacifie en raison de la présence d'éléments lourds dans leur atmosphère. Leur opacité croît brutalement au niveau de 54000K qui pourrait correspondre à une augmentation notable d'éléments du groupe du fer.

D'autres étoiles naines sont des sources de rayons X peu pénétrants et de rayonnement ultraviolet de très forte énergie. Dans une étoile naine ordinaire, l'atmosphère relativement froide et si peu épaisse qu'elle est a peu près transparente aux rayons X. Mais exceptionnellement quelques rares naines X telle HZ43 présente une couronne qui irradie fortement en rayons X car son atmosphère d'hydrogène et d'hélium est portée entre 1 et 10 millions de degrés. Grâce à cette opportunité, les astrophysiciens peuvent étudier la structure de son atmosphère au moyen de satellites sensibles à ce rayonnement tel ROSAT ou Chandra.

## **Les novae**

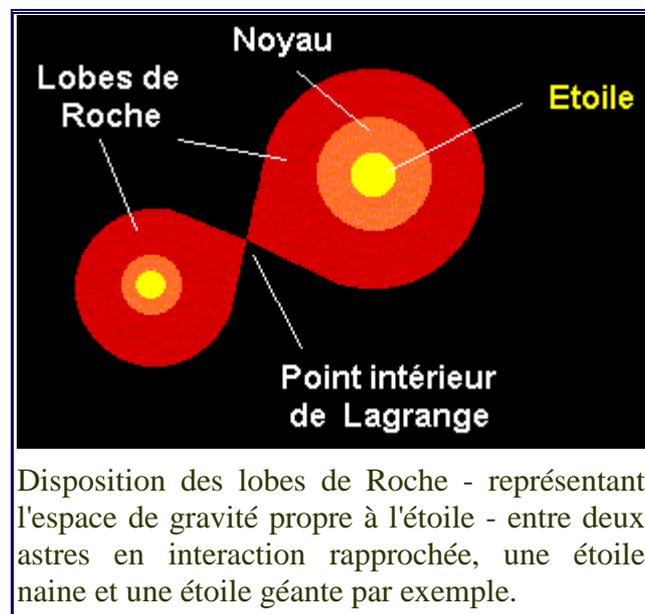
Dans notre Galaxie, chaque année une centaine d'étoiles deviennent perceptibles dans le ciel, parfois en des endroits où il ne semblait y avoir auparavant qu'une banale étoile, semblable à ses congénères. Mais la plupart d'entre elles restent invisibles, trop éloignées ou masquées par les nuages denses de poussières.

Ces étoiles "nouvelles" ou novae ont vu en quelques jours ou en quelques semaines leur éclat multiplié par un coefficient de mille ou du million, pour atteindre les premières magnitudes. Le 29 octobre 1952, UV Ceti est passée de la magnitude 12.3 à 6.8 en 20 sec, Krüger 60B passa de la 12<sup>ème</sup> à la 9<sup>ème</sup> magnitude en quelques heures ! L'analyse spectrale a montré que l'augmentation d'éclat correspondait à une activité intense au sein de l'étoile qui se manifeste

par une explosion de matière : les analyses spectrales révèlent des raies d'émission intenses, principalement celles de la série de l'Hydrogène de Balmer.

Les spécialistes tentent de démontrer que la majorité des novae sont en fait des systèmes doubles dont les individus subissent des effets de marées gravitationnelles extrêmement violents. Les phénomènes les plus intenses de cette catégorie sont vraisemblablement liés aux étoiles denses, aux étoiles à neutrons, aux pulsars et aux trous noirs.

Pour corroborer cette hypothèse, lors de l'explosion de la nova X de la Mouche (Nova Muscae alias GRS 1124-684) qui se produisit en 1991, le télescope orbital franco-russe Sigma a mis en évidence des rayonnements gamma d'une énergie de 200 à 500 KeV, plus brillants que ceux émis par la nébuleuse du Crabe ! Cette énergie est caractéristique d'un processus d'annihilation électron-positron. Selon A. Goldwurm de l'équipe Sigma cette découverte serait la signature de l'interaction entre un plasma très chaud et un trou noir. Etant donné que la matière ne peut-être refroidie par le rayonnement de l'étoile, le plasma est porté à de très hautes températures où il peut émettre un rayonnement de haute énergie.



Lorsque la zone d'attraction de l'étoile la moins dense (une étoile géante par exemple) dépasse le "lobe de Roche", l'étoile ne peut retenir les couches extérieures de son enveloppe qui se libèrent, l'étoile perdant ainsi quelque  $10^{-4} M_{\odot}$  qui se dissipent sous forme de gaz et de plasma. Ensuite, sous l'effet de sa propre gravité, l'enveloppe de l'étoile se recontracte. Ce plasma est libéré de façon plus ou moins continue et se met en orbite autour de l'étoile. Au bout d'un certain temps, nécessaire pour que les réactions thermonucléaires se déclenchent, des zones brillantes apparaissent dans son atmosphère, tel qu'on a pu en observer dans Nova Cygni 1975 (V1500).

Si la matière libérée par l'étoile géante se propage au-delà du lobe de Roche, elle se déverse sur son compagnon en formant un disque d'accrétion dont la température peut atteindre 10000 K. En tombant dans les couches superficielles de l'étoile dense, ce plasma provoque une augmentation de la pression et de la température qui réamorcent les réactions de fusion thermonucléaire en surface. Ce réamorçage ne produit pas de gigantesque explosion car il ne met en jeu qu'une toute petite partie de la naine blanche; seule la surface de l'étoile est touchée, 95% de l'astre ne subissant aucune altération, comme si rien de spécial ne se produisait. C'est ce réamorçage thermonucléaire qui est à l'origine de l'accroissement d'éclat

de l'étoile naine. Elle devient une nova. Le 29 août 1975 Nova Cygni passa d'une température superficielle de 13000 K au stade pré-nova à 300000 K le 5 novembre, sautant de la classe spectrale F5 Ib à O9, passant d'une couleur verdâtre à bleutée.

Si l'accrétion est beaucoup plus importante, nous pouvons assister à une explosion qui peut disloquer l'étoile ou l'éjecter de son orbite. Elle devient une supernova.

Les novae se répartissent en cinq catégories :

- Les *novae rapides* (NA) dont l'éclat peut augmenter de 10 magnitudes en l'espace de quelques jours,
- Les *novae lentes* (NB) dont l'augmentation d'éclat est plus régulier, s'étalant sur une période 15 jours environ avec un maximum qui peut persister plusieurs mois (Nova Herculis 1934),
- Les *novae récurrentes* (NR) qui présentent des sursauts d'éclats à des intervalles de quelques dizaines d'années, telles T Corona Borealis (1866, 1946) ou RS Ophiuchus (1958, 1967).
- Les *novae naines* qui sont des étoiles variables cataclysmiques dont l'éclat augmente irrégulièrement de plusieurs magnitudes en quelques heures (U Geminorum). Cet événement est la plus spectaculaire évolution que puisse subir une étoile variable.
- Les *novae-X* dont l'éclat augmente principalement en rayonnement X. Cette émission peut dépasser les plus intenses sources X galactiques en une dizaine de jours. La plupart sont associées à des étoiles très faibles ( $16^{\text{eme}}$  magnitude environ).

## **Les étoiles neutrons**

En 1934, Walter Baade et Fritz Zwicky prédisaient l'existence d'étoiles constituées de neutrons et établirent leur connexion avec l'explosion des supernovae. Leur théorie sera développée de façon rigoureuse par J.Oppenheimer et G.Volkoff<sup>1</sup> en 1939.

Leurs équations précisent que lorsque le coeur d'une étoile dépasse 1.4 fois la masse du Soleil mais sans dépasser  $5.8 M_{\odot}$ , les forces gravitationnelles sont si importantes qu'elles peuvent dépasser la force totale des électrons dont l'interaction électromagnétique peut empêcher l'effondrement des petites étoiles naines ainsi que nous l'avons vu précédemment.

Bravant la limite de Chandrasekhar la partie externe du noyau continue alors de s'effondrer. La pression électronique est tellement élevée que les électrons acquièrent une vitesse relativiste leur permettant de franchir les barrières du noyau atomique, jusqu'à ce qu'ils soient arrêtés par les forces nucléaires intra-atomiques de l'interaction forte, c'est l'effet de la pression de dégénérescence : les électrons libérés de leur orbite s'annihilent avec les protons des noyaux. Leur charge devient neutre ce qui transforme le noyau de l'étoile en une sorte de nucléon aux proportions astronomiques. C'est une étoile dite "dégénérée", dont la matière s'est transformée en neutron, d'où l'étoile a tiré son nom. Contrairement à l'état libre des neutrons, une fois confinés ou stabilisés dans un atome, leur durée de vie dépasse les 15 minutes fatidiques - heureusement, sans quoi tout l'univers s'écroulerait au terme de ce délai !

- Le coeur de l'étoile peut à présent résister à la force gravitationnelle et ne s'effondre plus. L'équilibre de l'étoile est assuré.

Les étoiles ayant plus de  $8 M_{\odot}$  sur la Séquence principale mais qui ne dépassent pas environ  $30$  ou  $40 M_{\odot}$  génèrent en fin de cycle des noyaux d'étoiles blanches dont la masse

---

critique peut s'effondrer jusqu'à former des étoiles neutrons et déclencher la phase supernova. Ce fut notamment le cas pour l'étoile géante bleue Sanduleak -202°69, alias SN1987A. Les étoiles ayant une masse critique plus élevée, sans toutefois dépasser 60 à 100  $M_{\odot}$  sur la Séquence principale évolueront également jusqu'à la transition étoile naine-étoile neutron mais se métamorphoseront ensuite en trou noir.

### **Structure interne et propriétés**

Quelle est la constitution interne d'une étoile neutron ? La matière fortement comprimée applique en force les lois de la chromodynamique quantique qui régissent les propriétés de la matière neutronique et celles de la relativité qui régissent également son comportement global à travers l'effet de la gravitation. Mais dans ces conditions extrêmes, nous connaissons mal les états de la matière et les façons dont elle s'organise en fonction de la pression. Plusieurs modèles sont actuellement à l'étude mais il leur manque une validation expérimentale en laboratoire ou dans l'espace, deux conditions impossibles à réunir vu les conditions physiques nécessaires. On ne peut donc qu'imaginer leur état et proposer des scénarii tenant compte d'expériences et de simulations aussi proches que possible des conditions régnant dans ces étoiles dégénérées. Nos modèles pèchent donc par approximation et présentent un certain degré d'incertitude.

Dans tous les cas, la couche neutronique directement en contact avec l'espace est cristallisée sur moins de 100m d'épaisseur pour former une croûte solide d'une densité d'environ  $10^6$  g/cm<sup>3</sup>. Sous celle-ci la croûte se stratifie en deux zones. Dans les premiers 500m se forme une croûte externe de neutrons, solide et mêlée de gaz d'électrons relativistes dégénérés. Sa densité est très variable, oscillant entre  $10^6$  et  $4 \times 10^{11}$  g/cm<sup>3</sup>. Juste en dessous se trouve la croûte interne. Il s'agit également d'une enveloppe solide mais cette fois constituée de neutrons et de gaz neutroniques superfluide. Elle s'étend sur 1 km seulement et présente une densité comprise entre  $4 \times 10^{11}$  et  $2 \times 10^{14}$  g/cm<sup>3</sup>. Entre la croûte et le coeur existe une zone interface qui occupe 80% du volume constituée d'un liquide de neutrons superfluide. Enfin, on suppose qu'il existe un coeur. Il pourrait être solide avec une densité qui pourrait atteindre  $10^{18}$  g/cm<sup>3</sup> ! Dans ce coeur se manifeste des phénomènes gravito-quantiques excessivement violents et chaotiques conduisant à des phénomènes inconnus que nos théories permettent tout juste de modéliser. Que s'y passe-t-il, quelle est cette matière, on l'ignore. Le coeur pourrait contenir des neutrons à l'état solide, des mésons condensés, voire même des quarks étrange (saveur s). Il s'agit toutefois de spéculations

### **Densité et luminosité d'Eddington**

Une étoile neutron de quelques masses solaires présente un rayon de 5 à 15 km seulement, ce qui représente également le diamètre final de l'effondrement des supernovae. Parvenue à ce stade, la densité du coeur d'une étoile neutron équivaut à des milliards de milliards de fois celle du plomb. Si le plomb présente une densité de 11.25, seul l'osmium et l'iridium présentent une densité supérieure à 22.6 (même l'uranium est plus "léger" avec une densité de 19) mais il n'existe aucun atome plus dense à la surface de la Terre. Pour y parvenir il faut soit excercer une force de pression supplémentaire sur la matière soit augmenter la force gravitationnelle (mais cela dépend uniquement de la masse) et donc la confiner dans une enceinte. C'est exactement les conditions régnant dans une étoile neutron.

Réduit à l'état cristallin ou mieux encore de fluide neutronique superfluide, un centimètre cube de cette matière peut aisément peser plusieurs centaines de milliards de tonnes sur Terre ! Pas question de la manipuler comme un sucre ou une boule de papier ! De toute façon vous n'en auriez même pas le temps car elle ne pourrait même pas se maintenir à la surface de la Terre et s'enfoncerait à une vitesse relativiste (au moins 70000 km/s) jusqu'au noyau. C'est bien sûr une analogie toute théorique. Sa densité a été décrite comme équivalent à

l'empaquetage de toutes les voitures du monde dans un dé à coudre ! Et encore, je pense qu'il en manquerait "quelques camions"... Trêve de plaisanterie, une étoile neutron est réellement un objet étrange au point que même que son rayonnement a subi les effets de l'effondrement stellaire.

La matière est tellement comprimée que son champ magnétique peut atteindre une intensité de  $10^9$  tesla, alors qu'un Soleil en pleine activité ne franchit même pas l'unité et il est dix mille fois moins intense pendant les phases calmes de son activité de surface !

Comment une telle masse peut-elle tenir dans un corps aussi petit sans le faire éclater ? Pour cela il faut se replonger dans un cours d'astrophysique et se rappeler la limite imposée par la "luminosité d'Eddington" qui impose un seuil d'équilibre entre gravitation et pression de radiation. Si le Soleil par exemple voulait émettre un rayonnement thermique proche de l'énergie d'une étoile neutron ou d'un pulsar X, sachant que sa luminosité d'Eddington serait égale à 25000 fois sa luminosité actuelle, sa surface devrait être cent mille milliards ( $10^{15}$ ) de fois plus lumineuse, soit quelques milliards de fois supérieure à la luminosité d'Eddington. En conséquence, sa surface devra être réduite dans un facteur comparable pour ne pas dépasser la luminosité critique au risque de voler en éclats par l'intensité des radiations, face auxquelles même les forces inter-atomiques sont impuissantes.

C'est la raison pour laquelle toutes les étoiles émettant un intense rayonnement X ne font que quelques dizaines de kilomètres de rayon, tandis que les astres rayonnant des photons gamma se réduisent à un volume encore plus étroit de quelques kilomètres de rayons.

### **Energie du rayonnement**

Mais d'où cette petite étoile tire-t-elle une nouvelle fois autant d'énergie ? A l'image de la conservation du moment angulaire, pendant l'effondrement stellaire le flux magnétique, c'est-à-dire le produit de l'intensité du champ magnétique par la surface de l'étoile reste constant. Ce phénomène explique qu'une petite étoile de cet acabit présente un champ magnétique des milliards de fois supérieur à celui du Soleil.

Ce n'est pas tout. Avec une densité aussi élevée, la force de gravité à la surface d'une étoile neutron atteint  $10^{11}$  fois celle que nous connaissons ici bas et l'énergie de liaison qui unit ses neutrons atteint 10% de leur masse au repos contre seulement 0.7% pour le noyau d'hélium élaboré dans le chaudron solaire !

Ces phénomènes extrêmes qui s'expliquent tous par des lois physiques provoquent l'émission d'une énergie considérable supérieure à 100 MeV/nucléon, un taux de conversion bien supérieur à celui d'une réaction thermonucléaire de fusion qui libère environ 8 MeV/nucléon.

Cela s'explique à nouveau par les propriétés de l'astre : intense champ magnétique conjugué à une rotation rapide, l'étoile neutron se transforme en générateur de courant, en dynamo, à l'instar des installations du CERN ! Une étoile neutron peut générer des particules capables de développer 10 millions de milliards de volts !

Par respect des lois qui gouvernent le corps noir, étant donné que son volume est tellement réduit, une étoile neutron qui veut briller comme le Soleil doit, en vertu de la loi de Stefan briller deux milliards de fois plus que le Soleil. Mais cela la contraint de monter en température. Il n'est donc pas étonnant de constater que la surface d'une étoile neutron peut atteindre 10 millions de degrés, juste ce qu'il faut pour qu'elle ait la luminosité du Soleil. Mais malheureusement elle restera invisible; à cette température elle brille surtout en lumière X et gamma, ce qui ravit les chercheurs spécialisés dans ces disciplines. Pour les binaires X le

---

rayonnement X est dix mille fois plus intense que la lumière visible du Soleil et peut atteindre  $10^{38}$  ergs/sec.

Comme beaucoup d'étoiles, la majorité des étoiles neutrons tournent sur elles-mêmes suite à une impulsion initiale qu'elles ont probablement reçue au cours de leur formation et qui a été accélérée au cours de leur effondrement. En effet, pendant qu'elle implose, à l'image des patineuses qui rabattent leurs bras pour tourner sur elles-mêmes de plus en plus vite, les étoiles neutrons présentent une vitesse de rotation qui peut s'élever à plusieurs milliers de tours par seconde ! Vu la densité de l'astre, ce mouvement est rigide.

Ce mouvement de toupie est parfaitement naturel car il est proportionnel à la masse, à la vitesse angulaire et au rayon de l'étoile, c'est ce qu'on appelle la conservation du moment angulaire. Prenons un exemple. A masse égale, si le rayon d'une étoile neutron devient dix fois plus petit qu'au départ, sa vitesse angulaire doit être proportionnelle au carré de son rayon, c'est-à-dire que sa vitesse de rotation doit être cent fois plus rapide qu'au départ ! Si le Soleil devenait une étoile aussi compacte, il passerait d'un rayon de près de 700000 km à quelque 15 km. Effectuant actuellement une rotation en quelque 25 jours, une fois comprimé il devrait tourner sur lui-même à raison de... 1000 tours/ sec ! C'est inimaginable et pourtant ce genre d'étoile existe !

On estime aujourd'hui qu'il existe 100 millions d'étoiles neutrons dans notre Galaxie, soit une étoile neutron pour un peu plus de 1000 étoiles ordinaires. La plupart sont "mortes" et ne dissipent plus d'énergie mais beaucoup sont encore actives et observables.

Dans leur évolution, les étoiles neutrons sont non seulement les filles dégénérées d'étoiles naines massives mais sont également associées aux pulsars.

## Les pulsars

Déjà conçus théoriquement depuis les années 1930 par J.Oppenheimer, ces objets ont été observés pour la première fois en 1967 par l'équipe d'Anthony Hewish de Cambridge (GB) dont le premier, PSR 0531-21 se trouve justement dans M1, le seul visible optiquement à la magnitude 16.

Les pulsars sont des étoiles neutrons d'environ 20 km de diamètre dont la masse peut ne pas dépasser  $1.5 M_{\odot}$  et qui sont en rotation rapide sur elles-mêmes du fait de la conservation du moment angulaire que nous venons d'évoquer. Les pulsars présentent la particularité d'émettre des jets de rayonnements très puissants à travers tout le spectre à des intervalles très réguliers, ce qu'on appelle des pulses. Ce phénomène oscillant est à l'origine de leur nom, "*Pulsating star*". Très réguliers, il s'agit en fait de véritables horloges sidérales avec, pour le pulsar du Crabe une période de 33,730 ms pour les flashes radios et optiques. La dérive est voisine du millionième de seconde par an !

Ce rayonnement est provoqué par l'accélération de particules chargées jusqu'à des vitesses proches de celle de la lumière. Ces pulsations sont si intenses, rapides et stables que les chercheurs anglais crurent un temps avoir capté les signaux d'une intelligence artificielle, jusqu'à croire aux "Little Green Men", les "petits hommes verts"!

Quelle est l'origine de ces émissions radioélectriques si particulières ? Le rayonnement radio focalisé que l'on observe peut avoir deux origines. Soit on considère que ce rayonnement est émis par les pôles magnétiques, où le champ magnétique est le plus intense ( $10^7$ - $10^{10}$  Gauss

---

en surface contre 0.6 Gauss sur Terre), soit il provient d'une région où la vitesse des particules est la plus élevée. Le premier modèle est celui dit de la "calotte polaire", le second du "cylindre-lumière". Les pulsars émettent un rayonnement intense qui impose une succession de processus physiques si complexes, qu'aucune des deux théories ne fait l'unanimité parmi les chercheurs.

Dans tous les cas, animés de vitesses relativistes les électrons émettent un rayonnement synchrotron qui est focalisé dans la direction de leur mouvement. Dans le modèle dit de la "calotte polaire", ce pinceau de lumière est canalisé par les lignes de forces du champ magnétique et s'échappe au-dessus des deux pôles magnétiques, là où le champ de force est ouvert et le plus intense.

On dénombre à ce jour plus de 1000 pulsars, leur nombre ayant doublé en l'espace de 10 ans. Une estimation basée sur leur éclat et leur distribution indiquerait que la Voie Lactée en contiendrait quelque 100000, dont une bonne partie se trouveraient dans les amas d'étoiles. Mais ils ne sont visibles que si leur axe magnétique est incliné sur l'axe de rotation, ce qui contraint la Terre à se trouver dans leur direction.

### **La famille des pulsars**

De nombreux pulsars ont été associés à des émissions de rayonnements visibles ou invisibles qui ont provoqué la fluorescence des nébuleuses qui les entoure quelquefois. C'est la découverte de ces nébuleuses annulaires qui permet de démontrer que la plupart des pulsars étaient associés à des résidus de supernovae.

Un autre type de pulsar, découvert en 1970 et baptisé **pulsar X** n'est pas lié à l'explosion d'une étoile. Leur émission limitée au rayonnement X n'est pas explicable par le modèle standard. La petite centaine de pulsars X dénombrés à ce jour sont agencés en systèmes multiples, où l'interaction d'un compagnon massif pourrait seule provoquer un tel processus physique. La plupart d'entre eux présentent un champ magnétique beaucoup plus intense de l'ordre de  $10^{12}$  Gauss, similaire à celui des pulsars isolés. Il s'agit de pulsars binaires dont le compagnon est une étoile géante ou un trou noir. La luminosité de ces pulsars oscille entre 200 et 50000 fois celle du Soleil et leur disque d'accrétion est porté à près de 10 millions de degrés, ce qui explique l'origine du rayonnement non thermique. Mais ce modèle ne s'applique pas aux pulsars les plus rapides, tournant sur eux-mêmes en une fraction de seconde !

Souvent unis en systèmes binaires, les pulsars les plus rapides, appelés **pulsars millisecondes**, sont vraisemblablement associés à des étoiles peu massives. Actuellement le pulsar milliseconde le plus rapide est PSR J1748-2446ad situé dans l'amas globulaire Terzan 5 situé à 28000 années-lumière dans la constellation du Sagittaire. Découvert en 2006 par Jason Hessels du McGill Pulsar Group, ce pulsar tourne sur lui-même à une vitesse de 716 rotations/sec (716 Hz) ! Cette vitesse impose que son diamètre ne peut pas être supérieur à environ 20 km. Toutefois, la vitesse maximale théorique d'un tel pulsar pourrait atteindre 2000 tours/seconde, au-delà de laquelle il se disloquerait.

Exceptionnellement, des volutes capturées sur le compagnon peuvent offrir une telle opacité qu'elles peuvent interrompre les émissions pulsées pendant plusieurs minutes. C'est le cas pour le pulsar PSR1957+20 baptisé la "Veuve noire" découvert par Andrew Fruchter, dont le compagnon reste invisible. Toutes les 9 heures le signal pulsé s'interrompt durant 50 minutes.

---

Signalons également l'existence d'une poignée de **pulsars gamma**. Extrêmement rares - en 2004 on en connaissait que 7 sur 1500 pulsars radios, dont un est situé dans les débris de la supernova Véla - ces sources galactiques intermittentes sont tout aussi énigmatiques que les pulsars X. La source de leur rayonnement pourrait être engendrée par un mécanisme d'accrétion qui accélérerait le plasma jusqu'à ce qu'il soit suffisamment chaud pour émettre un rayonnement de haute énergie. Pour les astronomes, les pulsars X et gamma sont probablement les deux variétés d'une même famille de pulsars sous l'emprise d'un corps très massif, probablement un trou noir. Mais tous les sursauts gamma n'ont pas cette origine, en particulier ceux du pulsar du Crabe qui ne sont pas associés à un trou noir. L'hypothèse de l'emprise des pulsars par un objet massif doit être confirmée et seuls les satellites d'observation gamma tel Sigma et Integral peuvent éclaircir ces mystères.

Enfin, les astronomes ont découvert que lorsque le champ magnétique d'un pulsar devenait très intense, de l'ordre de  $4.144 \times 10^{14}$  Gauss - cent fois supérieur à celui d'un pulsar ordinaire - son écorce pouvait se tordre et se déplacer sous son influence, émettant brièvement des rayons X ou gamma de 10 à 30 KeV. Ces tremblements se répétant rapidement et durant 0.1 à 3 secondes, ces pulsars sont dénommés **magnétars** ou "soft gamma repeaters", SGR. Leur champ magnétique est tellement intense qu'il peut ralentir la rotation de l'étoile !

Arrivé à une telle intensité, le champ magnétique obéit aux lois de l'électrodynamique quantique et provoque des effets très bizarres qui ne surviennent pas sous ce seuil critique. Parmi ces effets, citons la production de paire à partir d'un simple photon ou la séparation du photon.

A ce jour peu de magnétars ont été détectés. En 2003, et en l'espace de 20 ans, on n'avait découvert que 5 magnétars dans la Voie Lactée, mais selon Robert C. Duncan de l'Université du Texas, il devrait en exister des millions. La difficulté réside dans le fait qu'on ne peut les détecter qu'au début de leur vie. Enfin, un magnétar ne vit qu'environ 10000 ans, un instant à l'échelle cosmique, ce qui ne facilite pas non plus leur détection. Tous sont localisés dans ou près des résidus de supernovae, pour citer SGR 0525-66, SGR 1900+14, SGR 1806-20 et SGR 1627-41. On estime que 10% des résidus de supernovae pourraient contenir des magnétars.

---