

<b>Zeitschrift:</b>	Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerische Astronomische Gesellschaft
<b>Band:</b>	31 (1973)
<b>Heft:</b>	139
<b>Artikel:</b>	Les étoiles solides
<b>Autor:</b>	Andrillat, H.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-899721">https://doi.org/10.5169/seals-899721</a>

### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 09.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

### Bibliographie :

- AARSETH, S. J., 1971, *Astrophys. Space Sci.*, **14**, 20.  
ALLEN, C. W., 1962, *Astrophysical Quantities*, 2d ed., Athlone P., London.  
BARBARO, G., DALLAPORTA, N., FABRIS, G., 1969, *Astrophys. Space Sci.*, **3**, 123.  
BECKER, W., 1963, *ZfA*, **57**, 117.  
BECKER, W., FENKART, R., 1970, IAU Symposium No. 38, 205, D. Reidel Publ. Co., Dordrecht.
- BOUVIER, P., 1971, *Astron. Astrophys.*, **14**, 341.  
BOUVIER, P., 1972, *Astron. Astrophys.*, **21**, 441.  
BOUVIER, P., JANIN, G., 1970, *Astron. Astrophys.*, **9**, 461.  
HAYLI, A., 1970, *Astron. Astrophys.*, **7**, 17.  
LINDOFF, U., 1968, *Ark. Astr.*, **5**, 1.  
SPITZER, L., 1958, *Ap. J.*, **127**, 17.  
WIELEN, R., 1968, *Bull. Astron.*, **3** (3), 127.  
WIELEN, R., 1971, *Astron. Astrophys.*, **13**, 309.

Adresse de l'auteur : Prof. P. BOUVIER, Observatoire de Genève, CH-1290 Sauverny.

## Les étoiles solides

par H. ANDRILLAT,  
Observatoire de Haute-Provence

On se représente habituellement une étoile comme une gigantesque sphère de gaz à très haute température. Telle est en effet la structure de la plupart des étoiles et notre soleil ne fait pas exception. C'est une étoile normale. Aussi le terme d'étoile solide a de quoi nous surprendre, lorsqu'on a évidemment écarté la confusion possible avec une planète qui mérite certes le nom d'astre mais jamais celui d'étoile. Une planète n'est pas lumineuse par elle-même et si certaines apparaissent comme les astres les plus brillants du ciel, c'est seulement que, très proches de nous, elles réfléchissent la lumière du soleil. D'autre part, leur masse reste toujours très petite par rapport à celle d'une étoile. C'est donc bien d'étoiles que nous voulons parler en abordant cette question des étoiles solides, mais d'étoiles si particulières et par suite si peu nombreuses, si faibles aussi, qu'il a fallu attendre les tout derniers développements des techniques d'observation pour prouver leur existence.

### La masse et l'équilibre d'une étoile :

En appliquant les lois de la mécanique céleste aux mouvements observés des planètes, on trouve la masse du soleil avec une grande précision. Adoptons la valeur  $2 \cdot 10^{33}$  grammes. Comme 1 tonne vaut  $10^6$  grammes, c'est  $2 \cdot 10^{27}$  tonnes et comme  $10^9$  représente le milliard, la masse du soleil vaut donc deux milliards de milliards de milliards de tonnes ( $3 \times 9 = 27$ ). Curieusement cette masse du soleil représente bien la masse moyenne d'une étoile quelconque, qui n'est jamais très sensiblement inférieure et, sauf de très rares exceptions, ne dépasse pas 30 fois la masse solaire. A cette uniformité approximative des masses stellaires, il y a une raison profonde que nous pouvons entrevoir en réfléchissant sur les conditions d'équilibre de l'astre.

Une des lois les plus fondamentales du monde macroscopique est la *loi de gravitation universelle* ou *loi de Newton* : deux corps quelconques s'attirent en raison directe de leurs masses et en raison inverse du carré de leur distance.

On montre alors que si l'un des corps est sphérique et de densité homogène, c'est son centre qui, en fait, attire l'autre corps. Ainsi la chute d'un objet est dirigée vers le centre de la terre. De même dans une étoile à l'état gazeux, tout élément de matière est sollicité par une attraction vers le centre de l'astre. C'est ce que l'on appelle la *gravité*. Pour que cet élément de matière, comme tous les autres d'ailleurs, reste en place, ne rejoigne pas le centre et donc que l'étoile ne s'écroule pas sur elle-même par gravité, il faut, dans un milieu gazeux sans rigidité, qu'une force s'oppose à cette attraction centrale. Cette force compensatrice est précisément la pression du gaz lui-même et l'équilibre est schématisé par la figure 1 qui montre l'élément de matière, m, en équilibre, dans l'étoile sphérique de centre C, entre la gravité G et la pression P.

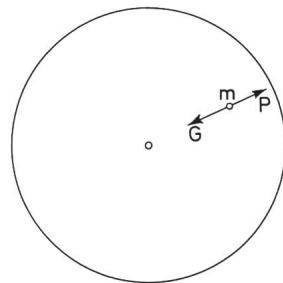


Fig. 1 : Equilibre entre la gravité et la pression de gaz dans une étoile normale.

Mais on sait bien en physique que pression et température sont deux grandeurs liées et qui varient d'ailleurs dans le même sens. Ainsi dans une étoile, la pression croît du bord au centre (de zéro à plusieurs milliards de fois la pression atmosphérique), comme la température qui, dans le cas du soleil par exemple, croît d'environ  $5800^\circ$  au bord jusqu'à plus de 10 millions de degrés au centre. Ces températures centrales sont les températures optimales pour que se réalise spontanément la transmutation en hélium de l'hydrogène, principal constituant de l'astre. On sait que cette transmutation est la source d'énergie de

toutes les étoiles. Fantastique réservoir d'hydrogène, une étoile comme le soleil ne brûle son combustible que, peu à peu, au voisinage de son centre où se trouve atteinte la température de  $10^7$  degrés et peut, par suite, débiter son énergie au taux actuel pendant des milliards d'années. C'est ce débit d'énergie qui, traversant l'étoile, maintient en chaque point la température et, partant, la pression qui s'oppose à son écroulement. Une étoile réalise ainsi un remarquable équilibre entre la gravité, la pression et la température d'une certaine masse d'hydrogène, provenant de la nébuleuse initiale.

#### *La naissance d'une étoile :*

On sait qu'une étoile se forme à partir des grands nuages de matière interstellaire, telle la belle nébuleuse d'Orion. Là, autour d'une zone de plus grande concentration, la gravité va «écrouler» une partie de la nébuleuse, augmentant, au centre de cette accrétion, pression et température. Cet écroulement cessera seulement lorsque la température centrale déclenchera la transmutation hydrogène-hélium et cet événement se produira lorsqu'une masse bien déterminée de matière nébulaire aura été mise en jeu. Alors seulement l'étoile est née. Elle a la masse en question, presque toujours la même, approximativement du même ordre de grandeur que la masse du soleil. L'astre atteint alors rapidement et pour des milliards d'années, son autonomie, les mécanismes antagonistes cités ci-dessus limitant toute nouvelle accrétion à des quantités négligeables de matière.

Ainsi pour des milliards d'années, l'astre est en équilibre gazeux avec une densité de l'ordre du gramme par  $\text{cm}^3$  en moyenne. Calculons cette densité pour le soleil dont on observe le rayon à  $700\,000 \text{ km} = 7 \cdot 10^{10} \text{ cm}$ . Le volume d'une sphère de rayon  $R$  est

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

et si  $M$  est la masse, sa densité est

$$d = \frac{M}{\frac{4\pi}{3} R^3}$$

avec  $M = 2 \cdot 10^{33}$  et  $R = 7 \cdot 10^{10}$ , on trouve  $d = 1,4 \text{ g/cm}^3$  pour la densité moyenne du soleil qui sera, en fait, évidemment croissante du bord au centre (comme la pression); elle est environ 100 fois plus petite au bord que sa valeur moyenne et 100 fois plus grande au centre, toutes valeurs parfaitement compatibles avec l'état gazeux.

#### *La fin de l'évolution stellaire et l'écroulement gravitationnel*

Une étude détaillée des fins d'évolution stellaire serait hors du sujet. Pour le point de vue qui nous intéresse ici, disons seulement que la fin d'évolution stellaire se produit lorsque cessent, par épuisement de l'hydrogène, les réactions énergétiques thermo-nucléaires et que reprend l'écroulement gravitationnel originel, longtemps stoppé par l'équilibre gazeux.

Très schématiquement c'est la valeur précise de la masse stellaire (qui, rappelons-le, varie peu d'une étoile à l'autre) qui va distinguer les cas possibles. Si la masse de l'étoile est inférieure à 1,2 fois celle du soleil (c'est en particulier le cas de celui-ci), la mort de l'étoile gazeuse est une simple extinction de son débit énergétique dans une proportion considérable, suivie d'une nouvelle étape d'écroulement gravitationnel qui l'amènera à un nouvel état d'équilibre, la *naine blanche* qui est, en partie, une *étoile solide*. Si au contraire, la masse de l'astre dépasse la valeur critique signalée, l'écroulement gravitationnel sera précédé de phénomènes cataclysmiques, dont le plus spectaculaire est l'explosion d'une supernova, l'étoile rayonnant alors, mais pour quelques semaines au plus, autant d'énergie que la galaxie toute entière à laquelle elle appartient. Une partie de la masse est alors éjectée, formant de belles nébulosités comme la nébuleuse du Crabe, encore en expansion rapide, ou les Dentelles du Cygne. Ce qui reste de l'étoile (et c'est très approximativement une masse égale à la masse solaire) participe à l'écroulement gravitationnel ultérieur, comme si la condensation ultime d'un astre ne devait porter que sur une masse bien déterminée, voisine de la masse solaire. Mais, dans ce cas, l'explosion de l'astre a en quelque sorte donné plus de force à l'écroulement qui suit et qui dépassera le stade de naine blanche, brisant facilement ce premier état solide possible, état d'équilibre de la naine blanche, pour atteindre le stade d'une *étoile à neutrons*, presque entièrement solide et d'une rigidité extrême par rapport au matériau qui constitue le noyau de la naine blanche<sup>1)</sup>.

Enfin l'écroulement gravitationnel, pour les masses initiales les plus grandes, peut atteindre une intensité encore plus grande, telle que même le superfluide des neutrons ne lui résiste pas. Il se poursuivra alors indéfiniment jusqu'au *trou noir* où l'astre disparaîtra dans un monde étrange, qui bouscule toutes les lois connues de notre physique.

#### *Les étapes de l'écroulement gravitationnel – Les pressions antagonistes – Les densités des étoiles solides*

Dans une étoile normale, le gaz est ionisé. Chaque atome est séparé de son cortège d'électrons. Les noyaux se trouvent donc noyés dans un véritable gaz d'électrons. Tant que les pressions ne sont pas trop grandes, la distribution des vitesses de ces électrons est conditionnée par la seule température suivant une répartition statistique, qu'on appelle une loi de Gauss. Sur le graphique de la figure No 2 qui la représente, on peut lire le nombre d'électrons qui ont une vitesse donnée, dans un certain volume, à une certaine température.

On voit qu'à la température  $T$ , il existe une vitesse privilégiée,  $v_m$  (vitesse moyenne). Presque tous les électrons se déplacent à cette vitesse. Très peu au contraire ont une vitesse très faible ou nulle, très peu ont une vitesse très grande, par exemple voisine de celle de la lumière.

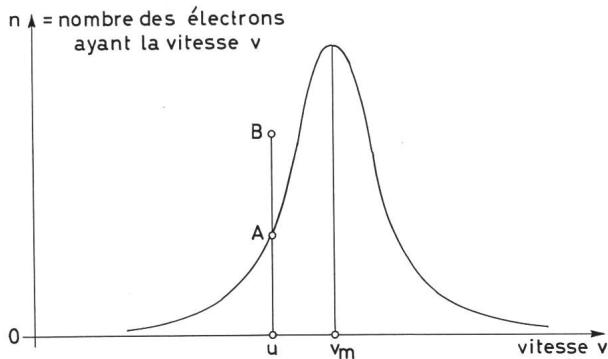


Fig. 2: Répartition statistique des électrons dans un gaz ionisé.

Si, dans ce même volume de gaz et toujours à la même température, la pression augmente, pour chaque vitesse le nombre d'électrons va augmenter dans un certain rapport, le même pour toutes les vitesses. Par exemple, il va doubler. A la vitesse  $u$ , on passera du nombre  $A$  au nombre  $B = 2A$ . La nouvelle courbe de répartition statistique, construite ainsi, point par point, est encore représentative d'une loi de Gauss.

Mais le processus ne peut se reproduire indéfiniment quand la pression augmente toujours. Dans le volume de gaz considéré, le nombre d'électrons ayant la vitesse  $v$  plafonne à une certaine valeur. Cela résulte d'un principe de la physique des particules, connu sous le nom de *principe d'exclusion de Pauli*, selon lequel il existe un volume élémentaire à l'intérieur duquel il ne peut pas y avoir 2 particules avec les mêmes caractéristiques quantiques. Ainsi, aux pressions très fortes, la courbe de répartition s'écrase sur un plafond comme le montre la figure 3.

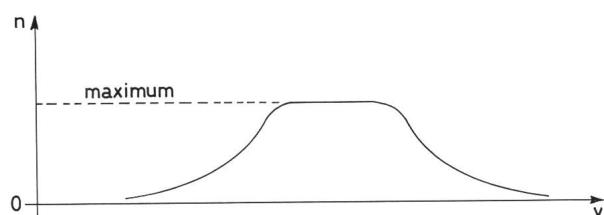


Fig. 3: Déformation de la courbe de répartition statistique à la dégénérescence du gaz.

On dit qu'il y a *dégénérescence du gaz d'électrons*. A la limite, à la *dégénérescence complète*, la courbe est «rectangulaire».

Toutes les vitesses sont également représentées, et surtout, la pression augmentant toujours, la population des électrons à grande vitesse devient très importante. A la limite, une grande proportion des électrons sont *relativistes*, c'est-à-dire ont des vitesses très voisines de celle de la lumière,  $c$ .

La partie hachurée de la figure 4 représente la population des électrons qui ont, par exemple, une vitesse supérieure à  $c/2$ .

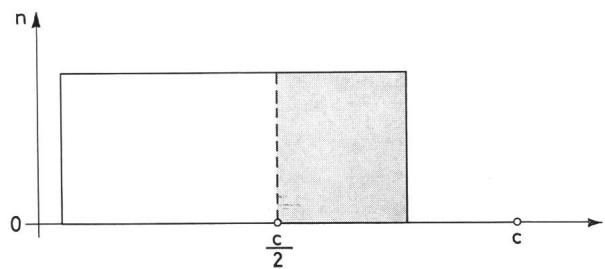


Fig. 4: Schéma de la dégénérescence complète.

La dégénérescence du gaz d'électrons se produit pour des densités de matière de l'ordre de  $10^6$  grammes/cm<sup>3</sup>. Les électrons à grande vitesse sont dotés de très hautes énergies qui constituent une pression antagoniste à l'écoulement gravitationnel qui les a créées. C'est la *pression de dégénérescence électronique*. (On peut en effet aisément montrer que toute pression est équivalente à une densité d'énergie).

C'est la pression de dégénérescence électronique qui arrête l'écoulement gravitationnel lorsque l'évolution de l'astre est figée au stade de naine blanche. Le milieu central est alors constitué par une matière hypersolide qui vaut à la naine blanche le nom d'étoile solide.

Dans les états solides qui nous sont familiers, la dégénérescence n'est que très partielle. Les noyaux sont encore enveloppés de nuages d'électrons qui atténuent grandement les forces de répulsion mutuelle dues aux charges électriques positives des noyaux. Le solide reste compressible, déformable. Au contraire, à la dégénérescence complète, les électrons passent si vite près des noyaux que leur influence devient inexistante. Les forces électriques de répulsion mutuelle agissent alors pleinement entre les noyaux qui s'équilibrent ainsi aux mailles d'un réseau cristallin d'une rigidité et d'une incompressibilité fantastiques, qui en font un solide parfait.

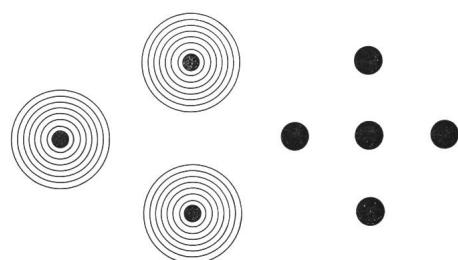


Fig. 5: Formation du réseau cristallin hypersolide.

Sur la fig. 5, à gauche, le cortège électronique atténue les répulsions mutuelles entre les noyaux. C'est le solide ordinaire encore facilement déformable et compressible. A droite, les interactions fortes entre les noyaux ne sont plus atténuées; la rigidité du réseau cristallin est des milliards de fois plus forte que dans le solide ordinaire.

La naine blanche est une étoile (par exemple le compagnon de Sirius) qui a la masse du soleil environ mais un rayon de l'ordre de grandeur de celui de la terre (rayon de la terre = 6378 km). Ainsi par rapport au soleil de rayon 700 000 km, elle a un rayon 100 fois plus petit, disons 7000 km. Son volume est donc un million de fois ( $10^6$ ) plus petit et, à masse égale, sa densité  $10^6$  fois plus grande. Du gramme par cm<sup>3</sup> pour une étoile gazeuse normale, comme le soleil, on atteint donc avec la naine blanche des densités moyennes de  $10^6$  g/cm<sup>3</sup>, soit une tonne par cm<sup>3</sup>. Evidemment la densité au centre sera encore plus grande ( $10^8$  g/cm<sup>3</sup>); elle sera beaucoup plus faible à la surface de l'astre.

La figure 6 représente la coupe d'une naine blanche qui garde encore sur la moitié extérieure de son rayon une densité compatible avec l'état gazeux mais présente un noyau central de matière dégénérée hypersolide. Les très hautes pressions centrales entraînent des températures très élevées même pour la partie gazeuse qui a par suite un rayonnement très «blanc». L'astre est bien une *naine* (elle n'est pas plus grosse qu'une planète) *blanche*.

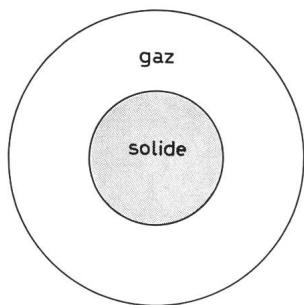
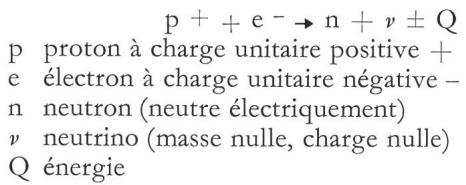


Fig. 6: Schéma de la naine blanche.

L'état de dégénérescence de la matière nous explique ainsi pourquoi l'écoulement gravitationnel peut être immobilisé au stade de naine blanche et l'on retrouve bien par l'*observation* de la masse et du rayon de l'astre la densité moyenne,  $10^6$  g/cm<sup>3</sup>, caractéristique de la dégénérescence électronique.

Comment l'hypersolidité de la matière dégénérée peut-elle être vaincue dans certains cas d'écoulement gravitationnel (avec une masse initiale plus grande et un cataclysme de fin d'évolution gazeuse) et conduire à un astre encore plus «écroulé» que la naine blanche?

La réponse se trouve dans les lois de la physique des particules. Quand, aux très hautes pressions, le gaz des électrons est presque entièrement *relativiste* (c'est-à-dire que tous les électrons ont des vitesses très voisines de celle de la lumière) chaque électron a une énergie telle qu'il peut percuter un proton (noyau de l'atome d'hydrogène) au lieu de se mettre normalement en orbite autour de lui pour reformer un atome d'hydrogène. La réaction donne naissance à un *neutron*.



Le neutron n'est stable qu'aux densités nucléaires (par exemple dans le noyau de l'atome d'hélium il y a 2 protons et 2 neutrons). Ces densités avoisinent  $10^{14}$  g/cm<sup>3</sup>.

Ainsi l'écoulement gravitationnel peut dépasser le stade du réseau cristallin de protons, signalé ci-dessus. Sous l'action des électrons relativistes, ces protons sont transformés en neutrons qui, électriquement neutres, n'exercent plus entre eux les forces de répulsions qui maintenaient les mailles du réseau cristallin. Les neutrons s'écoulent les uns sur les autres jusqu'aux densités nucléaires, où une nouvelle pression de dégénérescence, mais des noyaux eux-mêmes cette fois, vient contrebalancer l'écoulement gravitationnel. Ce milieu est appelé un superfluide. Il prend les propriétés mécaniques que l'on reconnaît à l'hélium liquide au-dessous du point  $\Lambda$ , c'est-à-dire au voisinage du zéro absolu. On lira à ce sujet avec intérêt l'article de Bruno Maraviglia dans *La Recherche* No 9, février 1971, p. 142, l'Hélium superfluide<sup>2</sup>).

Mais dans l'étoile à neutrons, la température est au contraire très élevée ( $10^8$  degrés absolus) et cela, presque partout à l'intérieur de l'astre. Sa rigidité est  $10^{18}$  fois celle de l'acier et son incompressibilité  $10^{20}$  fois plus grande. Le gradient des pressions du bord au centre n'autorise une atmosphère gazeuse que de quelques mètres d'épaisseur, puis, sous une croûte peu importante où se retrouve le milieu solide cristallin de la naine blanche, c'est le noyau du superfluide de neutrons qui constitue presque la totalité de l'astre<sup>3</sup>). Le rayonnement produit par l'atmosphère est si faible qu'une étoile à neutrons ne pourrait être vue que si elle était dans le système solaire parmi les planètes les plus proches. Par contre un intense rayonnement dans le domaine des ondes radioélectriques se produit. Les électrons relativistes qui s'échappent de l'astre spiralent autour des lignes de force de son champ magnétique. Ces électrons ainsi accélérés rayonnent. C'est le fameux rayonnement «synchrotron» découvert dans cet accélérateur de particules qui accélérerait pour la première fois des électrons jusqu'à des vitesses voisines de celle de la lumière. Ainsi des pôles magnétiques de l'astre s'échappent un jet de rayonnement puissant qui balaie l'espace un peu à la manière du faisceau lumineux d'un phare, pendant que l'astre tourne sur lui-même.

Découverts récemment en radio-astronomie, ces signaux cosmiques périodiques furent appelés les *pulsars*. Ils étaient la manifestation observationnelle des étoiles à neutrons.

De la période de rotation de l'astre, qui est la période du signal radio (période très courte: 0,03 sec pour le pulsar du Crabe), c'est un problème élémentaire.

taire de déduire le rayon de l'étoile. Une sphère de la dimension du soleil tourne lentement sur elle-même (période de rotation de l'ordre de 1 mois). Cette rotation s'accélère quand le rayon diminue mais suivant une loi simple connue (conservation du moment cinétique). On trouve que le pulsar a un rayon de quelques dizaines de kilomètres, disons de 15 à 30 km pour fixer les idées. On calcule alors des densités de  $10^{13}$  à  $10^{14}$  g/cm<sup>3</sup> qui rejoignent bien cette densité «nucléaire» de  $10^{14}$  g/cm<sup>3</sup> assurant la stabilité du neutron. Ainsi, dans le pulsar, on atteint des densités de cent millions de tonnes au cm<sup>3</sup>.

Le pulsar du Crabe est une étoile à neutrons, résidu de la supernova de 1054. Rapportée par les chroniques chinoises, elle était visible en plein jour et sa coquille gazeuse est encore observable aujourd'hui sous la forme de cette nébuleuse en expansion rapide qu'est la nébuleuse du Crabe.

### *Les trous noirs*

Si l'écoulement gravitationnel a la force de vaincre la résistance du superfluide de neutrons, l'astre ne sera pas stabilisé à l'état de pulsar mais continuera son écoulement jusqu'au trou noir où il doit disparaître à la vue de l'observateur extérieur.

La théorie de la relativité prévoit cette singularité du trou noir<sup>4)</sup>. C'est une sphère dont le rayon  $r_0$  est lié à la masse considérée  $M$  par la relation simple

$$r_0 = \frac{2GM}{c^2}$$

$G$  = coefficient d'attraction universelle

$c$  = vitesse de la lumière

$$G = 6,67 \cdot 10^{-8} \text{ c. g. s.}$$

$$c = 3 \cdot 10^{10} \text{ c. g. s.}$$

Pour une étoile comme le soleil ( $M = 2 \cdot 10^{33}$  g) le trou noir a un rayon de 3 km.

$$r_0 = \frac{2 \times 7 \times 10^{-8} \times 2 \cdot 10^{33}}{9 \cdot 10^{20}} = \frac{28}{9} \cdot 10^5 \text{ cm} = 3 \text{ km}$$

On voit que le rayon du pulsar n'est pas très différent de celui du trou noir. En fait, pour l'observateur extérieur à l'étoile en écoulement, le trou noir est une limite asymptotique (atteinte en un temps infini) mais qui se manifeste par une importante libération d'énergie. C'est toute l'énergie potentielle de la sphère matérielle qui est libérée. L'énergie potentielle d'une particule de masse  $m$  devant la masse totale  $M$  et à la distance  $r$  de son centre est

$$E = \frac{G M m}{r}$$

L'énergie libérée par l'implosion de la masse  $M$  dans le trou noir est donc approximativement

$$E = \frac{GM \cdot M}{r_0} = \frac{GM^2 c^2}{2GM} = \frac{1}{2} Mc^2$$

Elle est très grande à cause du coefficient  $c^2$  (c'est la moitié de l'énergie de masse). La densité du trou noir pour une étoile ( $M = 2 \cdot 10^{33}$  g,  $r_0 = 3$  km =  $3 \cdot 10^5$  cm) est de l'ordre de  $10^{16}$  g/cm<sup>3</sup> (dix milliards de tonnes par cm<sup>3</sup>). On ne sait plus guère à quelle phy-

sique correspond une telle densité, sans doute à la stabilité de particules étranges et fugitives que l'on commence à déceler dans les accélérateurs les plus puissants. Mais dans un tel champ de gravitation le rayonnement électromagnétique est émis avec un très grand *décalage spectral vers le rouge*, qui tend vers l'infini quand le rayon de l'astre tend vers  $r_0$ . Alors aucune radiation n'est plus visible de l'extérieur, d'où le nom de trou noir donné à cette sphère limite de l'écoulement gravitationnel (sphère de Schwarzschild).

On doit envisager 2 aspects de cette notion de trou noir: ou bien le trou noir est envisagé comme la limite asymptotique à l'écoulement d'une sphère matérielle initialement étendue, ou bien le trou noir doit être envisagé comme existant a priori, une masse ayant été créée, (en même temps que tout le reste du monde matériel) à l'intérieur de sa sphère de Schwarzschild. Elle forme alors un monde à part, d'où ne peut sortir aucun message électromagnétique et qui se manifeste seulement par sa masse et sa charge électrique éventuelle principalement. On notera bien que c'est le passage d'un monde à l'autre qui est impossible mais l'existence parallèle de ces deux sortes de mondes n'est pas contraire aux lois de la physique. D'un point de vue analogue, il n'est pas impossible, qu'au cours d'une réaction nucléaire, soient créées des particules à vitesses plus grandes que celle de la lumière, les tachyons. Ils poursuivent alors leur existence sans interaction notable avec notre monde matériel, où toute particule a une vitesse inférieure à  $c$ . Ce qui est impossible c'est de porter une particule ordinaire qui a déjà une vitesse inférieure à  $c$  à une vitesse supérieure à  $c$ , comme il serait impossible de ralentir un tachyon à une vitesse inférieure à  $c$ .

Les développements mathématiques de la théorie de la relativité montrent que les propriétés les plus fondamentales de la physique sont bouleversées à l'intérieur du trou noir. Notamment les propriétés de l'espace et du temps s'échangent. Dans notre monde, c'est le temps  $t$  qui est la variable directrice. Il est impossible de faire que  $t$  soit constant. Il est impossible qu'un système matériel quelconque remonte à son état passé et cela quelle que soit l'énergie disponible. Dans le trou noir c'est la distance au centre,  $r$ , qui devient variable directrice;  $r$  diminue inexorablement et tend vers le zéro. Avec beaucoup d'énergie, celle d'une fusée par exemple, nous pouvons faire en sorte de ne plus «tomber» sur la terre. Dans le trou noir, quelle que soit l'énergie disponible, on ne peut s'empêcher de tomber sur le centre, on ne peut faire en sorte que  $r$  reste constant ou augmente. Le trou noir «avalé» vers son centre toute particule de vitesse inférieure ou égale à  $c$ . C'est la raison pour laquelle aucun rayonnement (photon) ne peut plus sortir du trou noir et qu'il existe une distance critique par rapport au centre, en deçà de laquelle toute particule matérielle est inexorablement engloutie dans l'abîme du trou noir. Par contre, les tachyons, parce qu'ils

ont une vitesse supérieure à  $c$ , peuvent sortir du trou noir et c'est peut-être par leur intermédiaire que se résoud le problème de la conservation de la masse-énergie au cours d'une implosion.

Nous n'avons jusqu'ici considéré que l'implosion d'une masse stellaire de l'ordre de  $10^{33}$  grammes et la densité résultante est alors fantastique,  $10^{16}$  g/cm<sup>3</sup>. Mais d'une façon générale, on montre facilement que la densité à l'implosion, pour une masse  $M$  quelconque, est approximativement en grammes par cm<sup>3</sup>

$$d = \frac{10^{83}}{M^2} \text{ (M en gramme)}$$

(On retrouve bien  $d$  de l'ordre de  $10^{16}$  pour  $M = 2 \cdot 10^{33}$ ).

Mais si la masse  $M$  est très grande, elle implose pour des densités faibles, tout à fait compatibles avec l'état habituel de la matière, l'état gazeux par exemple. Ainsi la *formation*, à l'origine, d'une masse importante à l'intérieur de sa sphère de Schwarzschild est très vraisemblable.

#### Bibliographie :

- 1) K. S. THORNE, Gravitational collapse. Sci. American 217, 88 (1967).
- 2) B. MARAVIGLIA, L'hélium superfluide, La Recherche 9, 142 (1971).
- 3) M. A. RUDERMAN, Solid stars. Sci. Amer. 224, 24 (1971).
- 4) HAWKING and ELLIS, The large scale structure of the spacetime. Cambridge 1973.

Adresse de l'auteur : H. ANDRILLAT, Observatoire de Haute Provence (France).

## Meteorite

und was man über sie wissen sollte

von W. ZEITSCHEL, Hanau

Meteorite sind Körper aus Metall oder Stein, die aus dem Weltraum auf die Erde fallen. Alle Meteorite zeigen Eigenschaften, wie sie bei den bekannten Gesteinen unserer Erde nicht beobachtet werden. Es ist deshalb möglich, sie zu erkennen, auch wenn sie beim Fallen nicht gesehen worden sind.

Ein kleiner Meteorit kann möglicherweise ohne irgendwelche sichtbaren Anzeichen fallen, von einem Zischen abgesehen, das ein sich schnell durch die Luft bewegender Körper stets verursacht. Der Fall eines grossen Meteoriten ist stets von einem Aufsehen erregenden Aufleuchten und starken Geräuschen begleitet: Eine feurige Masse erscheint plötzlich am Himmel, fliegt schnell in einem Bogen und lässt einen leuchtenden Schweif hinter sich. Ein solcher Meteorit zerbricht meistens mit einer lauten Explosion, worauf seine Bruchstücke zu Boden fallen.

Hat man Gelegenheit, einen fliegenden Meteoriten zu beobachten, so schätzt man gewöhnlich den Ort seines Niedergangs viel näher, als er wirklich ist. Glaubt man annehmen zu dürfen, er sei hinter einem entfernten Baum niedergegangen, dann ist er meistens einige 100 km weiter entfernt zur Erde gefallen. Sind das Geräusch seines Fluges und der Schall seiner Explosion getrennt hörbar, so ist der Beobachter viele

Un noyau de galaxie, avec quelque  $10^8$  étoiles de masse moyenne  $10^{33}$  grammes, implose avec une densité de l'ordre du gramme par cm<sup>3</sup> (densité du soleil).

Chaque galaxie n'aurait-elle pas en son noyau un trou noir destiné à longue échéance à absorber toute la matière stellaire et interstellaire qui la constitue?

D'un autre point de vue, à partir d'un point quelconque comme centre, dans un milieu très tenu de densité très faible mais infiniment étendu, on peut toujours construire une sphère assez grande qui sera la sphère de Schwarzschild de la masse qu'elle contient. Il est remarquable qu'à considérer ainsi l'univers comme un gaz de galaxies de densité  $d = 10^{-30}$  grammes par cm<sup>3</sup> (valeur déduite des dénombrements des galaxies), on trouve pour le rayon de cette sphère, le «rayon» habituellement admis de notre univers, notion qui correspond en somme pour nous à une limite de nos observations, à un horizon du visible, isolés que nous sommes à l'intérieur d'un gigantesque trou noir, même si, au-delà, l'univers est infini.

Kilometer vom Ort des Niedergangs entfernt. Seine Entfernung von einem fliegenden Meteoriten kann durch das Zählen von Sekunden vom Augenblick der Explosion bis zur Wahrnehmung des Explosions-schalls in erster Näherung ermittelt werden, da der Schall in Luft etwa 330 m/sec. zurücklegt.

Beim Durchfliegen der Erdatmosphäre wird der Meteorit durch die Luftreibung so stark erhitzt, dass seine Oberfläche schmilzt. Während des Fluges verliert der Meteorit ständig Stücke seiner Schmelzrinde. Obschon ein fliegender Meteorit weißglühend erscheint, erhitzt er sich nicht durch und durch; da die Oberflächen-Hitze bald verschwindet, ist er bei seinem Auftreffen auf der Erde nicht mehr heiß, sodass man ihn anfassen kann. Keinesfalls kann er Heu, Gras oder andere brennbare Stoffe anzünden. Ist einem Meteoritenfall eine Explosion vorausgegangen, so ist es wahrscheinlich, dass viele Bruchstücke im Niedergangsgebiet zerstreut sind. Von explodierten Meteoriten hat man schon mehr als tausend Bruchstücke aufgefunden.

Drei verschiedene Meteoriten-Typen sind bekannt: Eisenmeteorite, Stein-Eisenmeteorite und Steinmeteorite.

Eisenmeteorite klingen metallisch, wenn man mit einem Hammer gegen sie schlägt. Sie sind verhältnis-