

> nucléons et les hyperons appartiennent à la famille des particules composites nommées baryons et formées chacune de trois quarks: le proton contient deux quarks *u* et un quark *d*, le neutron deux *d* et un *u*, tandis qu'un hyperon est formé d'au moins un quark *s*, une version plus massive et instable du quark *d*. Le noyau de l'étoile à neutrons pourrait aussi contenir des mésons, particules composées d'un quark et d'un antiquark. Mais, encore plus exotique, les neutrons pourraient se dissoudre complètement en libérant les quarks et les gluons (les particules vectrices de l'interaction forte, à laquelle sont sensibles les quarks), qui formeraient une sorte de mer (un «plasma») de particules évoluant librement les unes par rapport aux autres.

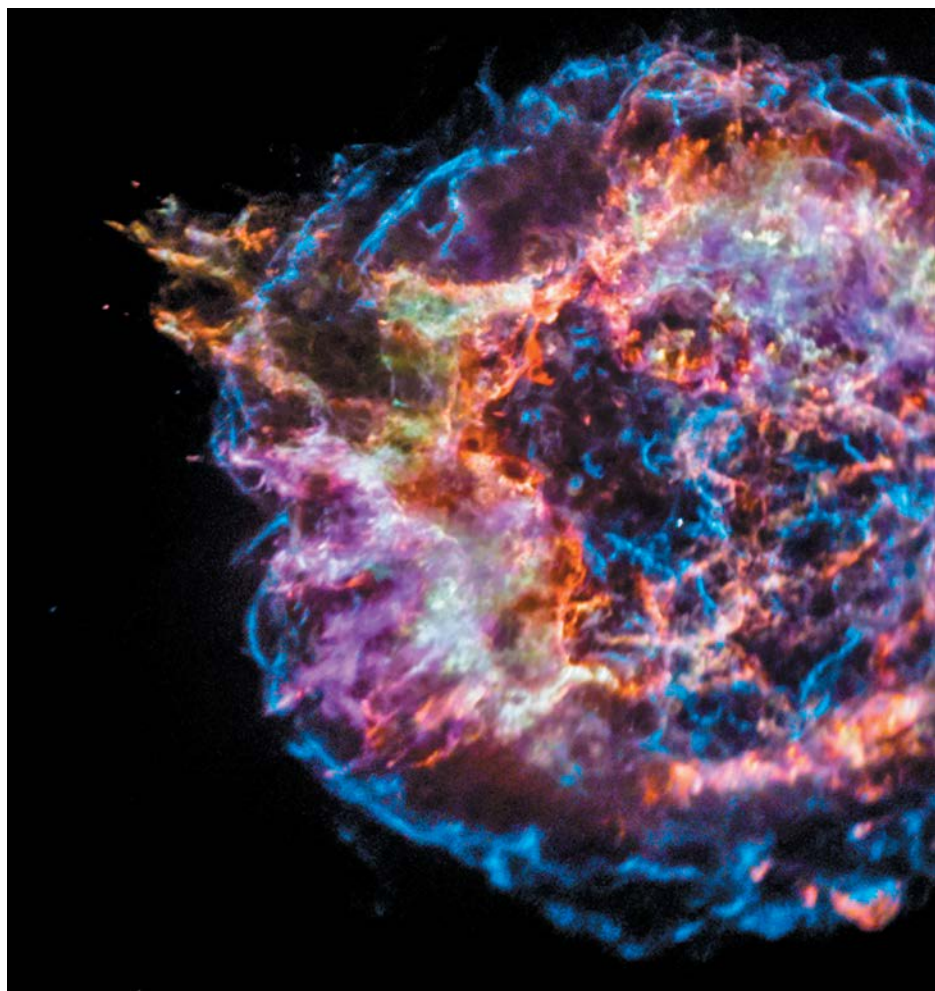
Faute de pouvoir ouvrir une étoile à neutrons et regarder à l'intérieur, il est difficile de trancher entre ces hypothèses. Mais une percée importante a été réalisée en août 2017, quand deux observatoires terrestres ont détecté des ondes gravitationnelles (des vibrations de l'espace-temps) vraisemblablement émises lors de la coalescence de deux étoiles à neutrons. Ces ondes étaient porteuses d'informations sur la masse et la taille des deux astres juste avant leur collision. Les physiciens ont utilisé ces données pour établir de nouvelles limites sur les propriétés et les compositions possibles des étoiles à neutrons.

De nouveaux indices nous parviennent aussi de l'expérience *Nicer* (*Neutron star interior composition explorer*), qui a démarré en juin 2017 sur l'ISS, la *Station spatiale internationale*. L'objectif de cette expérience est d'observer des pulsars, c'est-à-dire des étoiles à neutrons en rotation rapide, dotées d'un fort champ magnétique et émettant des faisceaux lumineux qui en font les «phares de l'Univers». Quand ces faisceaux balayent la Terre, nous voyons les pulsars clignoter jusqu'à 700 fois par seconde.

Grâce à ces expériences, et d'autres encore, nous avons enfin des raisons d'espérer en savoir davantage sur la structure interne des étoiles à neutrons, mais aussi sur le comportement de la matière dans des conditions extrêmes.

UNE NAISSANCE EXPLOSIVE

Les étoiles à neutrons naissent au cœur de cataclysmes cosmiques, les supernovæ. Quand une étoile massive épuise son combustible nucléaire, elle ne peut plus soutenir son propre poids et l'astre finit par s'effondrer. Par la violence du processus, ses couches externes sont soufflées dans l'espace, tandis que son cœur, principalement constitué de fer à ce stade de la vie de l'étoile, est comprimé. La gravité est telle qu'elle écrase littéralement les atomes, poussant les électrons à l'intérieur du noyau jusqu'à ce qu'ils fusionnent avec les protons pour former des neutrons. «Le fer est comprimé d'un facteur 100 000 dans toutes les



directions», explique Mark Alford, physicien à l'université Washington, à Saint Louis. «L'atome d'une taille d'un dixième de nanomètre se transforme en un paquet de neutrons de quelques femtomètres de diamètre.» [Un femtomètre, soit 10^{-15} mètre, représente un millionième de nanomètre, qui correspond lui-même à un milliardième de mètre.] C'est comme si la Terre était réduite aux dimensions d'un pâté de maisons. À la fin de l'effondrement, le vestige de l'étoile contient une vingtaine de neutrons pour chaque proton.

«L'étoile à neutrons est d'une certaine façon comparable à un unique noyau atomique géant, dit James Lattimer, astronome à l'université de Stony Brook, avec une différence essentielle: les interactions nucléaires assurent la cohésion dans un noyau tandis que ce rôle est assuré par la gravitation dans l'étoile à neutrons.»

Dès 1934, l'Allemand Walter Baade et l'Américano-Suisse Fritz Zwicky avaient été les premiers à imaginer qu'une supernova donnerait naissance à une étoile à neutrons. Cela ne faisait que deux ans que le physicien britannique James Chadwick avait découvert le neutron et de nombreux scientifiques étaient sceptiques sur l'existence d'un objet

Cassiopeïa A est le vestige d'une ancienne supernova. Au milieu du gaz expulsé lors de l'explosion, une étoile à neutrons s'est formée. Le refroidissement de cet astre est plus rapide que prévu. Une explication possible est qu'un superfluide de neutrons serait en train de se former.



aussi extrême qu'une étoile à neutrons. C'est seulement en 1967, lorsque Jocelyn Bell Burnell, alors en thèse à l'université de Cambridge, au Royaume-Uni, et ses collègues ont observé des pulsars (et que des chercheurs ont déterminé l'année suivante que ces pulsars devaient être des étoiles à neutrons en rotation) que l'idée s'est imposée.

D'après les astrophysiciens qui les étudient, les étoiles à neutrons auraient une masse comprise entre 1 et 2,5 fois celle du Soleil. Elles comporteraient au moins trois couches. La couche externe est une «atmosphère» gazeuse d'hydrogène et d'hélium de quelques centimètres d'épaisseur. Elle flotte au-dessus d'une «croûte» externe d'environ un kilomètre d'épaisseur et constituée de noyaux atomiques de fer disposés selon une structure cristalline, avec des neutrons et des électrons entre eux.

Le reste de l'astre, plus en profondeur, fait l'objet de davantage de spéculations. À mesure qu'on se rapproche du centre, la pression augmente et chaque noyau atomique renferme alors davantage de neutrons. Mais à partir d'un certain seuil, les noyaux saturent en neutrons, si bien qu'ils débordent: il ne s'agit plus de noyaux, mais juste d'un liquide de neutrons et de protons. Finalement, au plus profond de l'étoile, dans le noyau interne, il se pourrait bien qu'eux aussi se délitent. «Nous ne pouvons que spéculer sur cet état de la matière, car nous ne savons pas ce qui se passe avec des pressions et des densités aussi folles», commente Mark Alford. Au cœur de l'astre, dans le noyau interne, la densité pourrait

trouver pousser suffisamment près les uns des autres, ils formeraient des «paires de Cooper», à l'instar des électrons dans les matériaux supraconducteurs.

Un quark est un fermion, c'est-à-dire une particule dont le spin (moment cinétique intrinsèque) a, dans les unités appropriées, une valeur demi-entière ($1/2$ ou $3/2$, $5/2$, etc.). Un système de deux quarks se comporte comme un boson, une particule de spin entier (0 , 1 , etc.). Or les fermions et les bosons ne suivent pas les mêmes règles. Les premiers se conforment au principe d'exclusion de Pauli, selon lequel deux fermions identiques ne peuvent pas être dans le même état quantique. Les bosons ne sont pas soumis à une telle restriction. Individuellement, les quarks d'une étoile à neutrons sont obligés d'occuper des énergies toujours plus élevées pour satisfaire à la fois le principe d'exclusion de Pauli et la densité écrasante. Mais associés en paires pour former des bosons, ils peuvent rester dans l'état de plus basse énergie (la configuration privilégiée de tout système physique) et néanmoins s'entasser. Et dans ce cas, les paires de quarks forment un superfluide.

UN CŒUR SUPERFLUIDE ?

Même en dehors du cœur, dans le noyau externe, où les neutrons seraient encore intacts, ces derniers pourraient aussi s'apparier pour former un superfluide. En fait, les scientifiques sont quasiment certains que les neutrons se comportent ainsi. Les preuves viennent de l'observation des «glitches» des pulsars, des épisodes où la rotation de l'étoile à neutrons accélère soudainement.

Les théoriciens pensent que ces glitches se produisent quand la vitesse de rotation de l'étoile dans son ensemble se désynchronise de la rotation du superfluide sous la croûte. Globalement, la rotation de l'étoile ralentit naturellement au fil du temps car l'astre perd de l'énergie par l'émission d'un rayonnement électromagnétique et d'un vent stellaire; au contraire, le superfluide, qui s'écoule sans friction, ne ralentit pas. La contrainte mécanique engendrée par la différence de vitesse entre les deux couches emmagasine de l'énergie, laquelle se libère brutalement sous la forme de moment cinétique, ce qui réaccélère l'étoile. «C'est comme un tremblement de terre, explique James Lattimer; vous avez un hoquet et un sursaut d'énergie; la fréquence de rotation augmente brièvement avant de rediminuer.»

En 2011, James Lattimer et ses collègues ont affirmé avoir trouvé des indices de superfluidité dans le cœur d'une étoile à neutrons, mais le chercheur admet que le débat reste ouvert. Son équipe, dirigée par Dany Page, de l'université nationale autonome du Mexique, a analysé les données de quinze ans d'observation en rayons X de Cassiopee A (voir la photo ci-contre), >

La densité au cœur d'une étoile à neutrons serait 4 à 6 fois celle des noyaux atomiques

être 4 à 6 fois supérieure à celle des noyaux atomiques. «Il se peut que les neutrons soient écrasés les uns contre les autres et qu'on ne puisse plus vraiment parler d'un fluide de neutrons, mais d'un fluide de quarks.»

À quoi ressemble ce fluide? Une possibilité est que ces quarks forment un «superfluide», dépourvu de viscosité et qui, une fois mis en mouvement, ne s'arrêtera théoriquement jamais de bouger. Cet étrange état de la matière est envisageable car les quarks ont une affinité pour les autres quarks, et s'ils se