

L'ESSENTIEL

> Quand des étoiles massives épuisent leur combustible, elles s'effondrent en laissant parfois derrière elles un vestige extrêmement compact : une étoile à neutrons.

> À l'intérieur d'un tel astre, la gravité comprime la matière au point

de transformer la plupart des protons en neutrons. Mais on ignore quelle forme prend exactement la matière dans ces étoiles.

> Les neutrons s'apparentent peut-être pour créer un « superfluide » de viscosité nulle, ou se scindent en quarks et gluons, leurs composants élémentaires.

> Des observatoires capables de détecter les ondes gravitationnelles émises lors des collisions d'étoiles à neutrons et d'autres expériences apporteront de nouvelles lumières sur ces objets mystérieux.

L'AUTEURE



CLARA MOSKOWITZ
cheffe des rubriques
physique et espace
au magazine
Scientific American

Au cœur des étoiles à neutrons

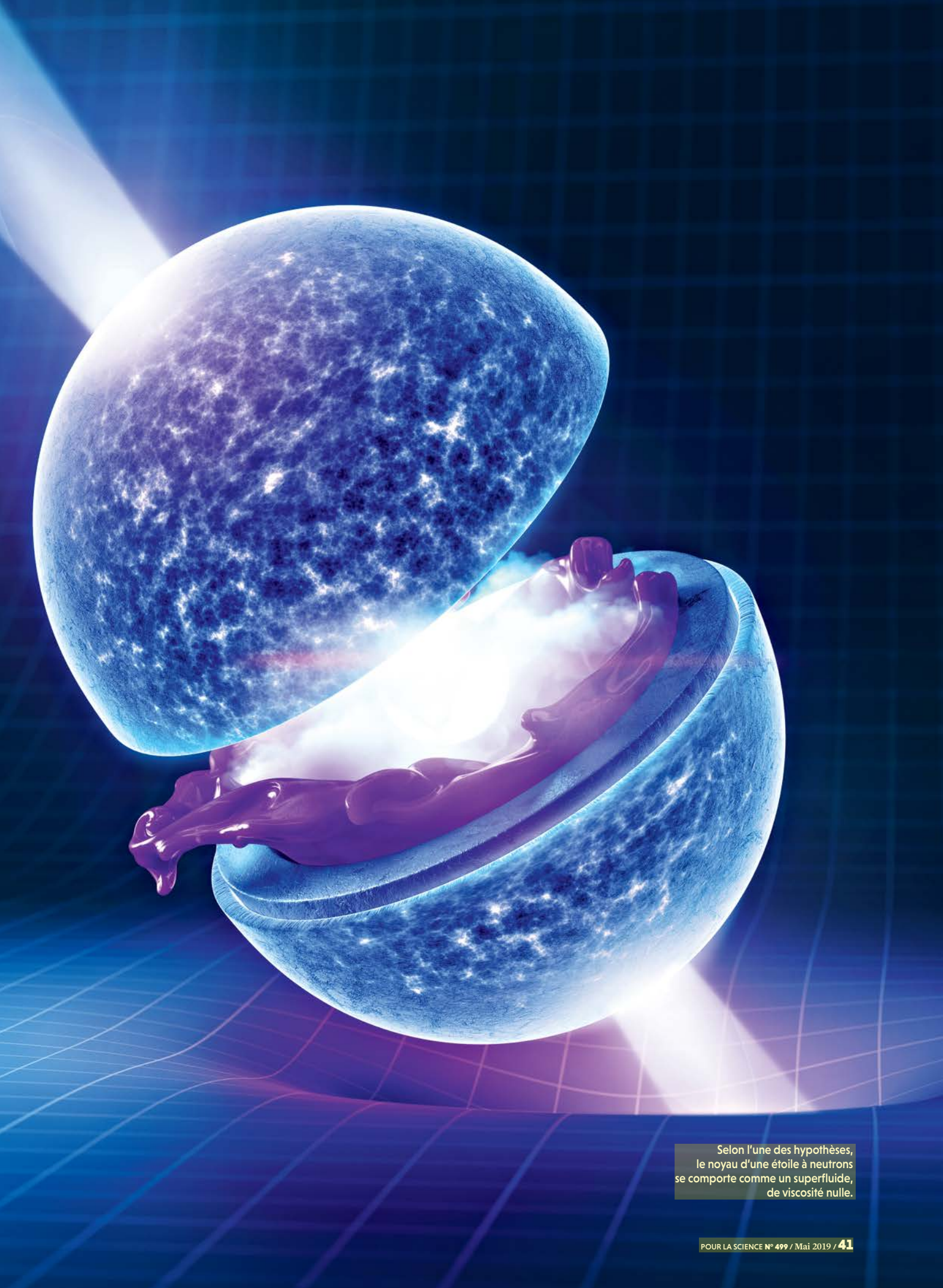
À l'intérieur des étoiles à neutrons règne une densité extrême, parmi les plus élevées de l'Univers. Sous quelle forme la matière s'y trouve-t-elle ? Superfluide de neutrons ? Quarks étranges ? De nouveaux indices éclairent cette vieille énigme.

Lorsqu'une étoile vingt fois plus massive que le Soleil meurt, elle devient une étoile à neutrons, un corps de la taille d'une grande ville et d'une densité extrême. « L'objet le plus insensé qui soit, mais dont la plupart des gens n'ont jamais entendu parler », commente l'astrophysicien Zaven Arzoumanian, qui travaille au centre de vol spatial Goddard de la Nasa. Ainsi, un morceau d'étoile à neutrons de la taille d'une balle de ping-pong pèserait plus d'un milliard de tonnes. Sous la surface de l'étoile, écrasés par la gravité, la plupart des protons et des électrons fusionneraient pour former des neutrons, d'où le nom de ces astres. Du moins est-ce l'image que les astrophysiciens se font de ces objets. Mais la question est loin d'être réglée.

La densité au sein d'une étoile à neutrons serait comparable à celle d'un noyau atomique, environ 10^{17} kilogrammes par mètre cube, densité que certaines expériences en laboratoire commencent seulement à reproduire. Avec des conditions aussi extrêmes, la

structure interne de ces objets reste quasi inconnue. « Ces objets présentent la plus forte densité stable de la matière, permise par les lois de la nature mais sous une forme que nous ne comprenons pas encore », explique Zaven Arzoumanian. C'est aussi la forme de matière subissant la plus forte gravité que l'on connaisse : si l'on y ajoutait un tout petit peu plus de masse, une étoile à neutrons se transformerait en un trou noir, objet qui déforme tellement l'espace-temps environnant que même la lumière ne peut s'en échapper.

Différentes hypothèses courent sur la structure interne des étoiles à neutrons. Certaines suggèrent que le cœur de ces astres est tout simplement rempli d'une phase dense de nucléons (les composants des noyaux atomiques), avec très majoritairement des neutrons et quelques protons de-ci de-là. D'autres scénarios reposent sur des configurations plus exotiques. L'une des possibilités est un mélange de nucléons et de particules moins courantes, des hypérons. Ces derniers ont été découverts dans les années 1950, grâce aux accélérateurs de particules et aux expériences associées. Les



Selon l'une des hypothèses,
le noyau d'une étoile à neutrons
se comporte comme un superfluide,
de viscosité nulle.

ν nucléons et les hypérons 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 hypéron 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.

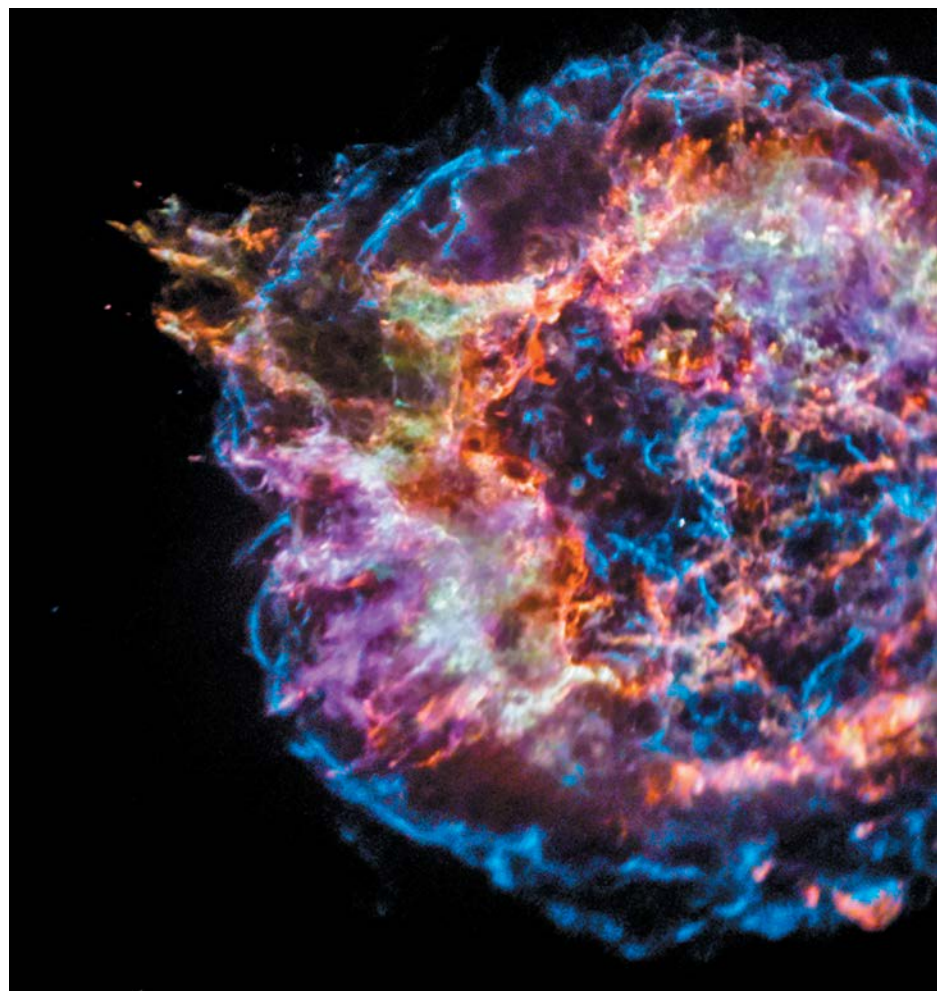
Faute de pouvoir ouvrir une étoile à neutrons et regarder à l'intérieur, il est difficile de trancher entre ces hypothèses. Mais une percée importante a été réalisée en août 2017, quand deux observatoires terrestres ont détecté des ondes gravitationnelles (des vibrations de l'espace-temps) vraisemblablement 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.