

gluons. Les expériences dans les accélérateurs de particules nous permettraient d'en savoir plus sur les conditions nécessaires pour l'apparition des hypérons, par exemple. Dans le cas du plasma de quarks et de gluons, l'expérience *Alice*, au LHC, est dédiée à l'étude de cet état de la matière. Mais ce plasma artificiel est obtenu pour une température élevée et une densité très faible, loin des conditions du cœur d'une étoile à neutrons, dont la température est relativement faible et la densité élevée. Des expériences de collisions d'ions lourds au *Ganil*, à Caen, dans les accélérateurs *Fair*, à Darmstadt, en Allemagne, ou *Nica*, à Doubna, en Russie, s'approcheront davantage des conditions de densité des étoiles à neutrons (voir l'encadré page suivante).

Une autre façon d'identifier la composition du cœur d'une étoile à neutrons consiste à remarquer que la structure interne de l'astre influe sur sa taille. En effet, dans le cas de neu-

trons ainsi que la façon dont le champ gravitationnel intense de ces étoiles déforme la trajectoire des photons, les chercheurs calculeront la masse et le rayon des pulsars et pourront les comparer. «Si *Nicer* trouve des étoiles de masses assez proches mais de rayons très différents, cela voudrait dire qu'il se passe quelque chose de bizarre», explique Mark Alford, comme une transition de phase entre deux formes de matière, qui ferait rétrécir l'étoile. Une telle transition pourrait se produire, par exemple, quand les neutrons se décomposent en quarks et en gluons.

Mesurer la taille des étoiles à neutrons est utile pour resserrer l'éventail des formes que peut y revêtir la matière. Les spécialistes ont longtemps pensé que la moitié des neutrons d'un tel astre se transformaient en hypérons; les calculs théoriques suggéraient alors qu'une étoile à neutrons ne pourrait pas dépasser 1,5 masse solaire. Mais en 2010, Paul Demorest, de l'Observatoire américain de radioastronomie, en Virginie, et son équipe ont découvert une étoile à neutrons de 1,97 masse solaire, ce qui contredisait la prédiction initiale. Aujourd'hui, les physiciens estiment que les hypérons constituent 10% au plus du contenu d'une étoile à neutrons.

De nouvelles et très différentes observations pourraient nous en apprendre encore plus sur les étoiles à neutrons. Depuis des années, les télescopes détectent des flashes de lumière, qu'on nomme des sursauts gamma, dont les chercheurs soupçonnent qu'ils résultent de collisions entre deux étoiles à neutrons. Un tel événement a été confirmé le 17 août 2017: deux dispositifs, *Ligo* (*Laser interferometer gravitational-wave observatory*, installé dans l'État de Washington et en Louisiane) et *Virgo* (près de Pise, en Italie) ont détecté simultanément des ondes gravitationnelles émises par une paire d'étoiles à neutrons spiralant l'une autour de l'autre avant de se percuter violemment et fusionner.

DES INFORMATIONS PAR LES ONDES GRAVITATIONNELLES

Jusqu'à cette date, toutes les ondes gravitationnelles détectées (la première a été enregistrée en 2015) avaient été le résultat de la fusion de deux trous noirs. Or un tel processus n'émet pas de rayonnement électromagnétique, contrairement à la coalescence de deux étoiles à neutrons. L'événement du 17 août 2017 est unique en son genre, pour l'instant, mais la détection de ses ondes gravitationnelles et de ses émissions électromagnétiques par plusieurs télescopes a apporté de nombreuses informations sur la façon dont s'est déroulée la collision. Une aubaine pour étudier la physique des étoiles à neutrons. «J'étais complètement époustoufflé», confie >

On estime aujourd'hui qu'une étoile à neutrons ne contient pas plus de 10% d'hypérons

trons intacts à l'intérieur du cœur, ceux-ci agiraient «comme des billes et constitueraient un cœur dur et compact», explique Zaven Arzumanian. Le cœur compact aurait tendance à repousser les couches externes et à augmenter la taille de l'étoile dans son ensemble. À l'inverse, si les neutrons se dissolvaient en une soupe de quarks et de gluons, l'étoile serait plus petite, «plus molle et compressible». C'est cette piste qui est explorée avec l'expérience *Nicer*. «L'un des principaux objectifs est de mesurer la masse et le rayon (de l'étoile à neutrons), explique Zaven Arzumanian, coresponsable et directeur scientifique de l'expérience *Nicer*, ce qui nous aidera à éliminer certaines théories.»

L'expérience *Nicer* se présente comme une boîte de la taille d'une machine à laver installée à l'extérieur de la *Station spatiale internationale*. Elle scrute plusieurs dizaines de pulsars répartis sur l'ensemble du ciel, et détecte les photons X qui en proviennent. En mesurant les temps d'arrivée et les énergies de ces photons,

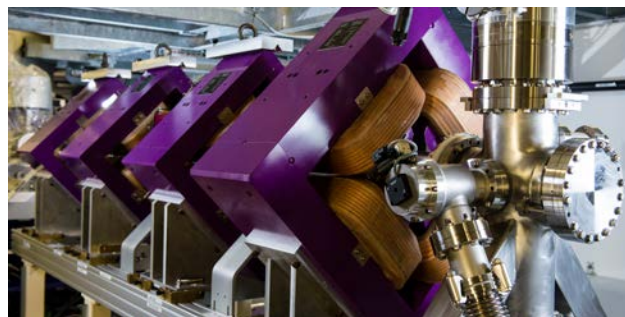
RECRÉER DE LA MATIÈRE D'ÉTOILE À NEUTRONS EN LABORATOIRE

Les conditions extrêmes régnant dans une étoile à neutrons sont très difficiles à reproduire en laboratoire. La densité supérieure à celle des noyaux atomiques ne peut être reproduite que lors de collisions entre des noyaux lourds, contenant beaucoup de protons et de neutrons (de l'or ou du plomb par exemple). Plusieurs collisionneurs visent à s'approcher au plus près des densités typiques du cœur des étoiles à neutrons, près de cinq fois la densité des noyaux atomiques.

L'installation Spiral2, inaugurée en 2016 au Ganil (Grand accélérateur national

d'ions lourds), à Caen, est un instrument qui peut faire entrer en collision des noyaux exotiques contenant plus de neutrons que les noyaux naturels. Le projet Nica, en construction à Doubna, en Russie, et prévu pour 2020, vise l'étude du plasma de quarks et de gluons, et la transition entre la matière nucléaire et ce plasma, grâce à des collisions entre des ions d'or. Enfin, le projet Fair, près de Darmstadt, en Allemagne, prévu pour 2025, atteindra des vitesses d'ions plus élevées que les deux autres, donc des densités d'énergie supérieures.

Si ces expériences vont nous apporter de nombreuses informations sur la matière dans des conditions extrêmes, elles seront insuffisantes pour déterminer la nature exacte de la matière dans les étoiles à neutrons. En effet, les densités atteintes seront dans la bonne gamme, mais la violence du choc entre les noyaux fait monter la température, qui est ainsi bien supérieure à celles régnant dans ces astres.



L'installation Spiral2, au Ganil, est constituée d'un accélérateur linéaire et de salles d'expériences. À partir d'ions légers ou lourds, il produit des noyaux exotiques pour mieux étudier la matière dans des conditions extrêmes.

Ensuite, la matière ultradense créée représente une quantité infime comparée aux 10^{30} kilogrammes d'une étoile à neutrons. Et sa durée de vie est très éphémère, alors qu'une étoile à neutrons est stable pendant des centaines d'années au moins, d'après les études sur des pulsars. Enfin, même dans le cas des noyaux exotiques du Ganil, on est loin d'atteindre la composition des étoiles à neutrons, qui est d'une vingtaine de neutrons pour un proton. Un tel rapport peut avoir une incidence

importante sur les propriétés de la matière.

Les résultats seront néanmoins intéressants et il ne faut pas oublier qu'ils ne représentent qu'une fraction de l'activité de recherche de ces installations, où l'on étudie aussi bien les propriétés fondamentales de la matière que l'ingénierie des matériaux, la chimie, la biologie ou la médecine.

JÉRÔME NOVAK

Laboratoire Luth,
CNRS-Observatoire de Paris

> James Lattimer. « Je pensais que c'était juste trop beau pour être vrai. »

L'analyse des signaux a montré que l'événement résultait de la collision d'une paire d'étoiles à neutrons située à environ 130 millions d'années-lumière de la Terre, chacune d'environ 1,4 masse solaire et de rayon compris entre 11 et 15 kilomètres avant la collision. Avec ces données, les scientifiques affinent les contraintes sur l'équation d'état des étoiles à neutrons. Cette équation, qui devrait s'appliquer à toutes les étoiles à neutrons de l'Univers, décrit la densité de la matière en fonction de la pression et de la température dans l'astre. Les théoriciens en ont proposé diverses formes, correspondant aux différentes hypothèses sur la nature de la matière au sein de ces astres, et les nouvelles mesures ont été l'occasion d'en écarter certaines.

Le rayon estimé pour les deux étoiles à neutrons détectées par *Ligo* et *Virgo* est relativement petit par rapport à leur masse. Ce résultat a surpris les astrophysiciens, car il met en difficulté certaines théories décrivant ces astres. Il n'est pas aisé d'inclure à la fois des étoiles à neutrons compactes et celles très massives, comme celle de 1,98 masse solaire, dans une même équation d'état. « Cela devient compliqué de satisfaire toutes les contraintes des observations avec une équation d'état

donnée », note Jocelyn Read, astrophysicienne à l'université d'État de Californie à Fullerton, qui codirige l'équipe Matière extrême de *Ligo*. « Essayer de faire des étoiles compactes, tout en expliquant des étoiles massives, devient un défi pour la théorie. C'est vraiment intéressant, et cela pourrait le devenir encore plus. »

Jusqu'à présent, *Ligo* et *Virgo* n'ont détecté que cette unique collision d'étoiles à neutrons, mais une autre observation analogue pourrait survenir à tout moment, les deux complexes de détection venant de reprendre leur campagne d'observations. « Je travaille depuis assez longtemps dans ce domaine, dit Jocelyn Read, et c'est tout simplement fantastique de dépasser l'époque des vœux pieux : "Et si nous pouvions voir des ondes gravitationnelles, nous pourrions faire ceci ou cela. Et si... Et si..." Maintenant, nous avons enfin la possibilité de faire ce dont nous rêvions. »

DES INDICES À LA PORTÉE DES DÉTECTEURS DE DEMAIN

Avec l'amélioration progressive de la sensibilité des détecteurs d'ondes gravitationnelles, les physiciens espèrent mettre leurs modèles encore plus à l'épreuve. Par exemple, une des façons de tester ce qu'il y a à l'intérieur d'une étoile à neutrons consiste à regarder les ondes gravitationnelles émises par un éventuel