

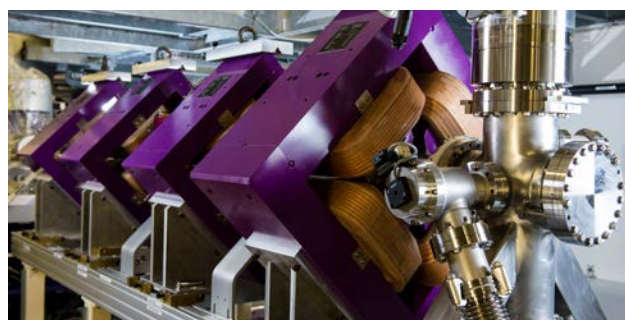
RECRÉER DE LA MATIÈRE D'ÉTOILE À NEUTRONS EN LABORATOIRE

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

liquide tourbillonnant en son sein; si le liquide a une viscosité très faible, voire nulle (comme un superfluide), il s'écoulera suivant certains régimes, des « modes r », où des ondes gravitationnelles sont émises. « Ces ondes gravitationnelles seraient beaucoup plus faibles que celles d'une collision », souligne Mark Alford. « C'est de la matière qui clapote tranquillement, par opposition à de la matière en train d'être déchirée. » Ce chercheur et ses collègues ont déterminé que la version *Advanced Ligo*, actuellement en service, ne sera pas capable de détecter les ondes associées aux modes r . Mais les futures améliorations de *Ligo*, ainsi que des observatoires en projet comme le *Einstein Telescope* en discussion en Europe, en seront peut-être capables.

ET LA GRAVITATION ?

Dévoiler la structure des étoiles à neutrons nous donnerait un tableau quasi complet des formes que peut prendre la matière, depuis les conditions les plus courantes jusqu'aux plus extrêmes. Et comprendre les étoiles à neutrons aurait un bénéfice supplémentaire : étudier ces astres permet, certes, de sonder les interactions nucléaires, mais ils offrent une possibilité de mieux comprendre l'interaction énigmatique qu'est la gravitation.

BIBLIOGRAPHIE

B. P. Abbott et al., GW170817 : measurements of neutron star radii and equation of state, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 121, article 161101, 2018.

J. Novak et M. Oertel, Les étoiles à neutrons : des sondes cosmiques, *Dossier Pour la Science*, n° 83, avril 2014.

D. Page et al., Rapid cooling of the neutron star in Cassiopeia A triggered by neutron superfluidity in dense matter, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 106, article 081101, 2011.

J. Novak, Les étoiles à neutrons, *Pour la Science*, n° 311, septembre 2003.

Les étoiles à neutrons ne sont pas le seul moyen employé pour étudier les interactions nucléaires. Dans le monde entier, des expériences sont en cours dans les accélérateurs de particules, qui opèrent tels des microscopes pour analyser l'intérieur du noyau atomique. « Les étoiles à neutrons sont un mélange de physique gravitationnelle et de physique nucléaire », souligne Or Hen, physicien à l'Institut de technologie du Massachusetts. « Pour le moment, nous utilisons les étoiles à neutrons comme un laboratoire pour comprendre la physique nucléaire. Mais comme nous avons accès à des noyaux ici sur Terre, nous devrions à terme parvenir à circonscrire assez bien l'aspect nucléaire du problème. Alors nous pourrions utiliser les étoiles à neutrons pour comprendre la gravitation, qui est l'un des plus grands défis de la physique. »

La gravitation telle que nous la comprenons actuellement (grâce à la théorie de la relativité générale d'Einstein) ne fait pas bon ménage avec la théorie de la physique quantique. À terme, il faudra repenser l'une ou l'autre, voire les deux théories, mais personne ne sait quelle piste est la bonne malgré de nombreuses tentatives. « Mais nous finirons bien par y arriver, conclut Or Hen, et c'est une perspective absolument passionnante. » ■

Il y a 50 ans, on a marché sur la Lune !

cycle de conférences

— les mercredis à 19h



Quel est l'héritage du programme Apollo ? Retournerons-nous sur la Lune dans un proche avenir ?

Accès gratuit dans la limite des places disponibles.

15 mai

La conquête lunaire : comment a-t-elle commencé ?
Jean-Pierre Martin, physicien, SAF.

22 mai

Saturn V, la « machine lunaire »
Rémi Tropé, médiateur scientifique au planétarium du Palais de la découverte.

29 mai

Formation de la Lune : ce que nous ont appris les vols Apollo
Charles Frankel, spécialiste de la géologie des planètes.

5 juin

Les exploits des missions Apollo : 12 hommes sur la Lune !
Philippe Henarejos, journaliste scientifique.

12 juin

Et si on y retournait ?
Philippe Coué, ingénieur, *International Astronautics Association* (IAA) ; **Bernard Foing**, astrophysicien spatial, ESA ; **Claudie Haigneré**, astronaute, ESA ; **Jean-Philippe Uzan**, astrophysicien, IAP.

Palais de la découverte

Avenue Franklin Delano Roosevelt - 75008 Paris

Ⓜ Champs-Élysées Clemenceau ou Franklin-Roosevelt

Informations sur palais-decouverte.fr

EN PARTENARIAT AVEC



AVEC LE SOUTIEN DE

Ciel & Espace L'ASTRONOMIE SCIENCE