

LES USAGES POLICIERS DE L'ADN S'ÉTENDENT

Depuis la mise au point des empreintes génétiques par le généticien britannique Alec Jeffreys, en 1985, la technique est utilisée en contexte policier. Cette approche, qui consiste aujourd'hui à caractériser une vingtaine de marqueurs microsatellites du génome, permet de distinguer suffisamment une personne d'une autre pour considérer que chacun de nous, à l'exception des vrais jumeaux, a une empreinte génétique unique.

La réalisation d'empreintes à partir de traces biologiques retrouvées sur une scène de crime (sperme, cheveux, cellules mortes) permet parfois de rapprocher différentes enquêtes (mêmes empreintes retrouvées sur différentes scènes), ou d'identifier un nouveau suspect (mêmes empreintes sur une trace et chez une personne testée). L'identité de deux empreintes ne prouve cependant pas la culpabilité du suspect : nous libérons en permanence des cellules mortes (cheveux, peau...) susceptibles de se retrouver sur la main d'une personne que nous avons saluée ou sur un mégot que nous avons jeté.

Depuis 1998, il existe en France un fichier automatisé des empreintes génétiques, le FNAEG, qui conserve les empreintes de toutes les personnes condamnées ou mises en cause pour une série de crimes et de délits. Aujourd'hui, ce fichier contient près de 3 millions d'empreintes génétiques, dont 75 % correspondent à des personnes mises en cause, mais non condamnées. En pratique, lorsqu'une empreinte est réalisée sur un échantillon prélevé sur une scène de crime, la loi française autorise de la comparer à toutes les empreintes présentes dans le FNAEG pour rechercher une correspondance et identifier ainsi un nouveau suspect. Depuis quelques années, il est également autorisé de rechercher si une empreinte du FNAEG, à défaut de correspondre exactement à l'empreinte identifiée, serait celle d'un parent ou d'un enfant biologique.

En 2018, l'arrestation par la police californienne de Joseph James DeAngelo a étendu encore ce principe. Pour identifier ce présumé meurtrier, violeur et voleur multirécidiviste recherché depuis le début des années 1970, les policiers ont en effet comparé l'ADN retrouvé sur plusieurs scènes de crime avec celui d'un site de généalogie génétique. Ils ont repéré une bonne

dizaine de personnes pouvant être de lointains cousins de la personne recherchée. En suivant les liens de parenté entre ces personnes, ils ont identifié un ancêtre commun vivant au début du XIX^e siècle. La reconstruction de la descendance de cet ancêtre – plus de 1 000 personnes – a permis d'affiner les recherches, jusqu'à l'identification de cet ancien policier de 73 ans.

Enfin, depuis un arrêt de la cour de Cassation de 2014, les enquêteurs sont autorisés, en France, à faire analyser une trace génétique pour obtenir des informations sur l'apparence de la personne correspondante : couleur de la peau, des cheveux, des yeux, origine biogéographique. La fiabilité de ces « portraits-robots génétiques » reste toutefois assez discutée.



Joseph James DeAngelo, auteur présumé d'au moins douze meurtres, une cinquantaine de viols et une centaine de cambriolages en Californie entre 1974 et 1986, a été identifié en 2018 par comparaison de l'ADN trouvé sur le terrain avec la base de données génomiques GEDmatch.

d'automatique. Cela pourrait renforcer encore la pression sociale qui s'exerce déjà sur les couples en les poussant à utiliser tous les moyens technologiques disponibles pour faire naître des enfants « en bonne santé », pour optimiser encore la sélection de vies considérées comme « valant le coup d'être vécues ».

Ces interrogations, qui sont loin d'épuiser le sujet, sont importantes au moment où le Parlement français s'apprête à examiner le nouveau projet de loi de bioéthique, dont un volet concerne les examens génétiques et la médecine génomique. D'autant que les progrès dans le domaine sont loin de se tarir.

Avec la révolution biotechnologique que représente le séquençage de nouvelle génération (NGS, pour *next generation sequencing*), qui permet de séquencer de grandes quantités d'ADN en des temps record, le coût de séquençage d'un génome humain a chuté de manière drastique cette dernière décennie. Alors que celui du premier génome humain avait coûté 3 milliards de dollars et duré 13 ans entre 1990 et 2003 avec des séquenceurs de type Sanger, un séquenceur NGS Illumina HiSeq X offre le

même résultat en une journée pour 1 000 dollars. La société Illumina a déjà promis le génome à 100 dollars d'ici à 2020 avec le nouveau séquenceur Illumina NovaSeq. De jeunes entreprises américaines de génomique comme Helix, Veritas Genetics ou Genecov visent par ailleurs à dépasser l'usage des puces à ADN, préconisé par les leaders actuels du marché des tests génétiques, pour rendre accessible au grand public le séquençage complet de leur génome. En 2018, deux entrepreneurs du secteur, Razib Khan et David Mittelman, soutenaient déjà, dans la revue *Genome Biology*, que l'ère des puces de SNP des années 2010 serait supplantée par la révolution du séquençage complet des génomes qui s'opérerait au grand jour dans les années 2020. Selon eux, le génome complet de 60 millions d'Américains sera séquencé d'ici à 2025. Si ces informations plus exhaustives contribueront à augmenter la précision des résultats des tests génétiques, elles augmenteront surtout la valeur commerciale des bases de données privées des entreprises qui, d'ores et déjà, font saliver les laboratoires pharmaceutiques. ■

BIBLIOGRAPHIE

P. Ducournau, **S'entreprendre avec ses gènes : Enquête sur l'auto-généralisation**, PUR, 2018.

M. Mathieu et P. Malzac, **Tests génétiques : illusion ou prédiction ?**, Le Muscadier, 2017.

C. Bourgain et P. Darlu, **ADN superstar ou superflic ? Les citoyens face à une molécule envahissante**, Le Seuil, 2013.

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

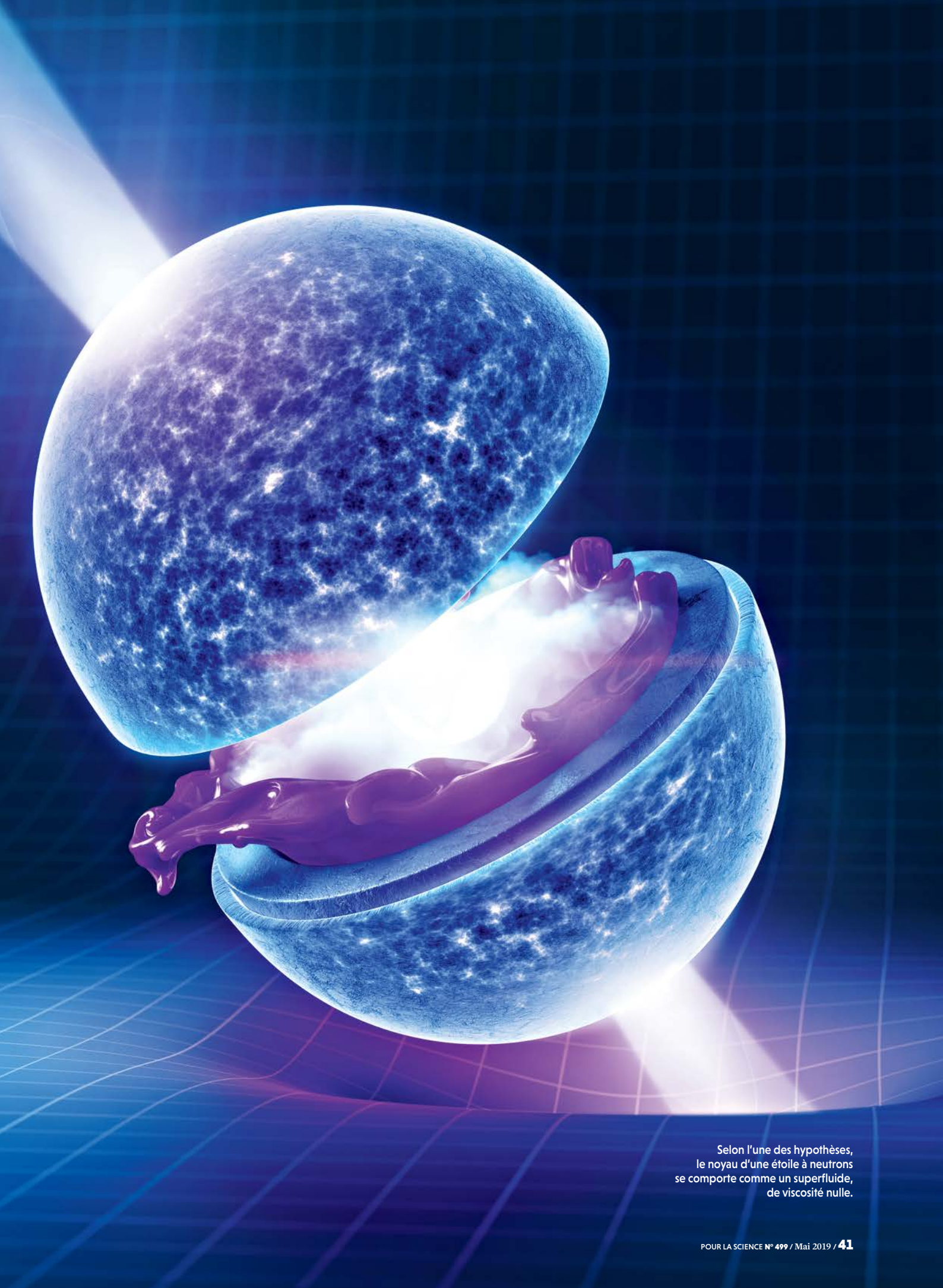
À l'intérieur des étoiles à neutrons règne une densité extrême, parmi les plus élevées de l'Univers. Sous quelle forme la matière s'y trouve-t-elle ? Superfluide de neutrons ? Quarks étranges ? De nouveaux indices éclairent cette vieille énigme.

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 hyperons. 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.

> 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.

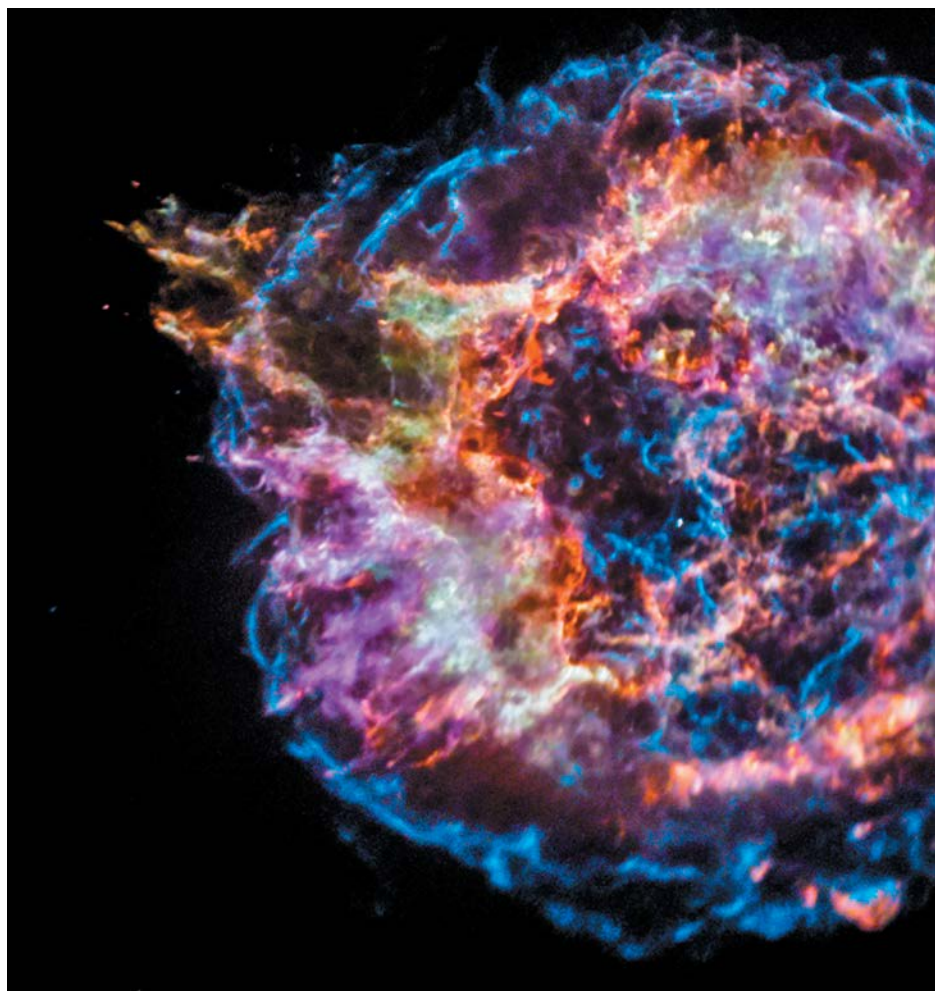
Faute de pouvoir ouvrir une étoile à neutrons et regarder à l'intérieur, il est difficile de trancher entre ces hypothèses. Mais une percée importante a été réalisée en août 2017, quand deux observatoires terrestres ont détecté des ondes gravitationnelles (des vibrations de l'espace-temps) vraisemblablement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

Cassiopeïe 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), >

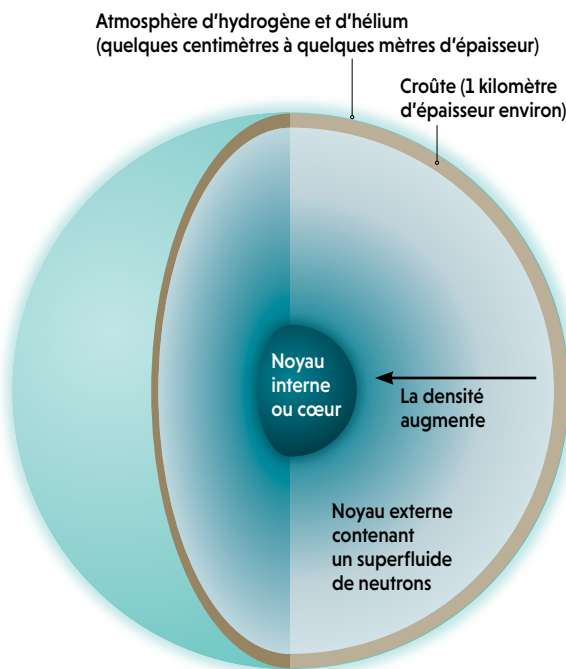
La densité au cœur d'une étoile à neutrons serait 4 à 6 fois celle des noyaux atomiques

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

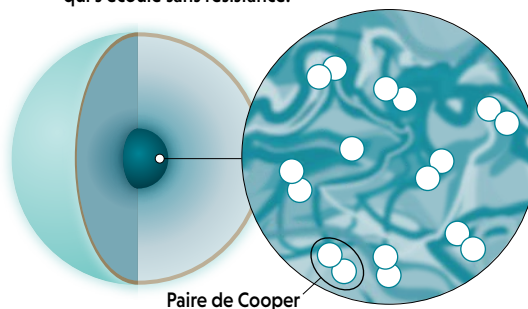
À L'INTÉRIEUR D'UNE ÉTOILE À NEUTRONS

Les étoiles à neutrons sont une énigme. On sait que leur surface est constituée d'une mince atmosphère gazeuse, surmontant une épaisse croûte de noyaux atomiques lourds (surtout du fer). Mais sous ces couches, la nature de la matière, que l'on suppose constituée principalement de neutrons, reste mal connue. À l'intérieur du cœur dense, la forme que revêtent ces neutrons, et leur possible décomposition en quarks et gluons, reste une question ouverte.



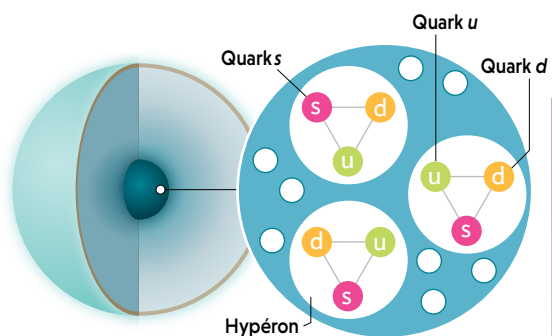
LE CŒUR, HYPOTHÈSE 1: DES MERS SUPERFLUIDES

Une possibilité est que les nucléons se transforment en un plasma de quarks et de gluons dans le noyau interne. Les quarks seraient alors tellement serrés qu'ils s'associeraient par deux pour former des « paires de Cooper ». Ces paires créent un « superfluide » qui s'écoule sans résistance.



LE CŒUR, HYPOTHÈSE 2: DES QUARKS ÉTRANGES

L'incroyable densité pourrait également entraîner la transformation des quarks du noyau interne, habituellement de types *u* ou *d*, en quarks exotiques *s*. Si les quarks se trouvent encore au sein de neutrons, ces neutrons deviendraient alors des hypérons.



> le vestige d'une supernova devenue visible au début du XVII^e siècle. Les astronomes ont trouvé que le pulsar au centre de la nébuleuse se refroidit plus vite que la théorie ne le suggère.

Une explication serait qu'au début de la formation du superfluide, beaucoup de neutrons s'appariaient, mais que ces paires, instables, se dissocieraient et se reformeraient souvent. Cette activité s'accompagnerait d'une importante émission de neutrinos vers l'espace. Ces particules emporteraient une grande quantité d'énergie, d'où le refroidissement plus rapide que prévu de l'astre. « C'est quelque chose que nous n'aurions jamais imaginé voir, commente James Lattimer. Mais par chance, cette étoile a juste l'âge qu'il faut pour voir cet effet. La confirmation viendra dans une cinquantaine d'années si l'astre commence à se refroidir plus lentement, parce qu'une fois que le superfluide est constitué, il ne reste plus d'excédent d'énergie à perdre. »

Les étoiles à neutrons pourraient ainsi héberger un superfluide dans leur noyau externe

et interne. Ils pourraient aussi abriter de la matière dite étrange car elle contiendrait des quarks *s*, ou étranges (*s* pour *strange* en anglais).

DE LA MATIÈRE « ÉTRANGE » ?

Il existe six sortes, ou « saveurs », de quarks : *u*, *d*, *c*, *s*, *t* et *b*. On ne trouve dans les atomes que les deux plus légers, *u* et *d*. Les autres saveurs sont plus massives et instables. Elles apparaissent, par exemple, dans les collisions de particules à hautes énergies dans des collisionneurs tels que le LHC (*Grand collisionneur de hadrons*) du Cern, près de Genève. Mais dans l'intérieur très dense des étoiles à neutrons, les quarks *u* et *d* contenus dans les neutrons se transformeraient parfois en quarks *s* (les autres saveurs sont tellement massives qu'elles ne se formeraient probablement pas même dans ces conditions extrêmes). Si des quarks *s* apparaissent et restent liés aux autres quarks, cela produira des hypérons.

Enfin, il est aussi possible que ces quarks soient présents dans le plasma de quarks et de

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 Arzumian. 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 Arzumian, 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,

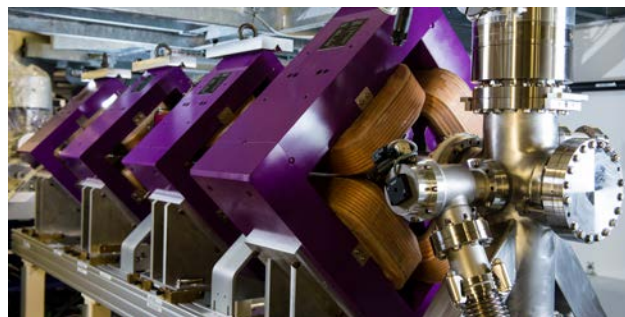
RECRÉER DE LA MATIÈRE D'ÉTOILE À NEUTRONS EN LABORATOIRE

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

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

④ Champs-Élysées Clemenceau ou Franklin-Roosevelt

Informations sur palais-decouverte.fr

EN PARTENARIAT AVEC



AVEC LE SOUTIEN DE

Ciel & Espace L'ASTRONOMIE SCIENCE

L'archéologue, le singe et l'outil

Plusieurs espèces de singes se servent de pierres pour accéder à certains aliments. Grâce aux traces qu'ils portent, de tels outils peuvent se révéler dans des fouilles archéologiques... et donner un éclairage nouveau sur l'apparition de la technique au sein des lignées préhumaines.

A photograph of a long-tailed macaque monkey on a rocky beach. The monkey is in the foreground, facing left, with its long tail visible. It appears to be using a rock as a tool. The background shows the ocean and a clear sky.

Des macaques birmans à longue queue utilisent des outils de pierre pour ouvrir des coquillages sur une plage de Thaïlande.