



# Astronomie dans le monde

## *Matière noire*

*Basé sur un communiqué ESA/Hubble*

Les observations du télescope spatial Hubble de la NASA/ESA et du Very Large Telescope de l'ESO permettent d'expliquer une discordance entre les observations de concentrations de matière noire dans un échantillon d'amas de galaxies massives et les simulations théoriques de la distribution de la matière noire dans les amas. Cette étude indique que certaines concentrations de matière noire à petite échelle produisent des effets de lentille dix fois plus importants que prévu.

La matière noire est à l'origine de l'attraction qui maintient ensemble les étoiles, la poussière et le gaz dans les galaxies. Cette substance mystérieuse constitue la majeure partie de la masse d'une galaxie et est à la base de la structure à grande échelle de l'Univers. Comme la matière noire n'émet, n'absorbe ni ne réfléchit la lumière, sa présence n'est connue que par son attraction gravitationnelle sur la matière visible dans l'espace.

Les amas de galaxies, les structures les plus massives les plus récemment assemblées de l'Univers, sont également les plus grands

réservoirs de matière noire et c'est la gravité qui assure leur cohésion.

Les amas de galaxies sont des laboratoires idéaux pour tester les simulations numériques de l'Univers et voir si elles reproduisent fidèlement leur comportement comme lentilles gravitationnelles. De fait, de nombreux tests ont mis au jour une lacune dans les théories.

La distribution de la matière noire dans les amas est cartographiée en mesurant leur effet de lentille gravitationnelle. La gravité de la matière noire concentrée en amas amplifie et déforme la lumière des objets d'arrière-plan. Outre des distorsions, une lentille gravitationnelle peut souvent aussi produire plusieurs images d'une même galaxie éloignée.

Plus la concentration de matière noire dans un amas est élevée, plus son effet de déformation de la lumière est spectaculaire. La présence de petites concentrations de matière noire dans des galaxies augmente la distorsion. Dans un certain sens, l'amas de galaxies agit comme une lentille à grande échelle dans laquelle sont intégrées de nombreuses lentilles plus petites.

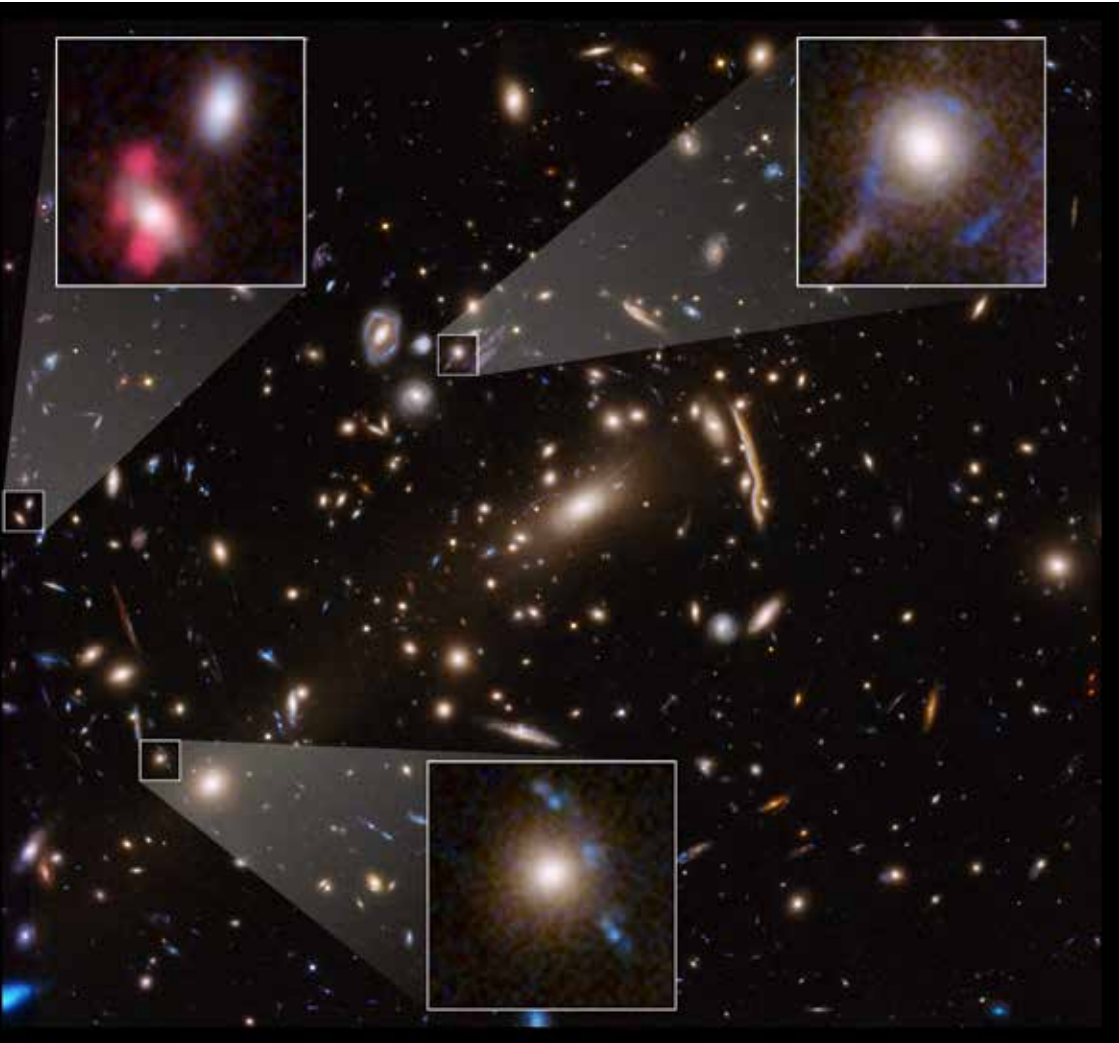


Des images particulièrement nettes ont été prises par les caméras à grand champ WFC 3 et ACS du télescope spatial Hubble. Associées aux spectres du VLT, elles ont permis de produire une carte précise de la matière noire, principalement dans trois amas de galaxies, MACS J1206.2-0847, MACS J0416.1-2403 et Abell S1063.

À la surprise des astronomes, en plus des arcs et des allongements spectaculaires des galaxies lointaines produits par la lentille gravitationnelle de chaque amas, les images de Hubble ont également révélé un nombre inattendu d'arcs plus petits et d'images déformées nichés près du noyau de chaque amas, là où résident les galaxies les plus massives. Les chercheurs pensent que les lentilles imbriquées sont produites par des concentrations de matière à l'intérieur des amas de galaxies individuels. Des observations spectroscopiques de suivi ont permis de mesurer la vitesse des étoiles à l'intérieur de plusieurs des amas de galaxies et d'en déterminer la masse.

*L'amas massif de galaxies MACS J1206 vu par le télescope spatial Hubble. On distingue les images distordues de galaxies d'arrière-plan. Un artiste a superposé à l'image des concentrations de matière noire (en bleu) permettant d'expliquer les distorsions.*  
(NASA, ESA, G. Caminha/University of Groningen, M. Meneghetti/Observatory of Astrophysics and Space Science of Bologna, P. Natarajan/Yale University, the CLASH team, M. Kornmesser/ESA/Hubble)

Les astronomes ont comparé les cartes de matière noire avec celles produites par des simulations d'amas de galaxies de masses similaires situés à peu près aux mêmes distances. Les amas du modèle informatique ne présentaient pas le même niveau de concentration de matière noire aux plus petites échelles – celles des galaxies individuelles.



*L'amas massif de galaxies MACSJ 1206 vu par le télescope spatial Hubble. Les galaxies dans les trois agrandissements – obtenus par l'instrument MUSE du VLT de l'ESO – montrent d'importants effets de lentille gravitationnelle. En haut à droite et en bas, deux galaxies lointaines bleues sont déformées par les galaxies plus rouges de l'amas et forment des anneaux et des images multiples.*

*Les taches rouges autour de la galaxie en haut à gauche ne sont pas visibles sur l'image Hubble. Ce sont les images multiples de nuages d'hydrogène situés en arrière-plan, probablement dans une galaxie faible. (NASA, ESA, G. Caminha/University of Groningen, M. Meneghetti/Observatory of Astrophysics and Space Science of Bologna, P. Natarajan/Yale University, the CLASH team)*

## **Champ magnétique extrême**

Les pulsars XRBP (accreting X-ray binary pulsars) sont des systèmes composés d'une étoile à neutrons et d'une compagne stellaire normale. L'étoile à neutrons accrète de la matière et forme un disque d'accrétion environnant. Si le champ magnétique est fort, la matière accrétée est canalisée par des lignes magnétiques sur la surface de l'étoile à neutrons, ce qui entraîne l'émission de rayons X.

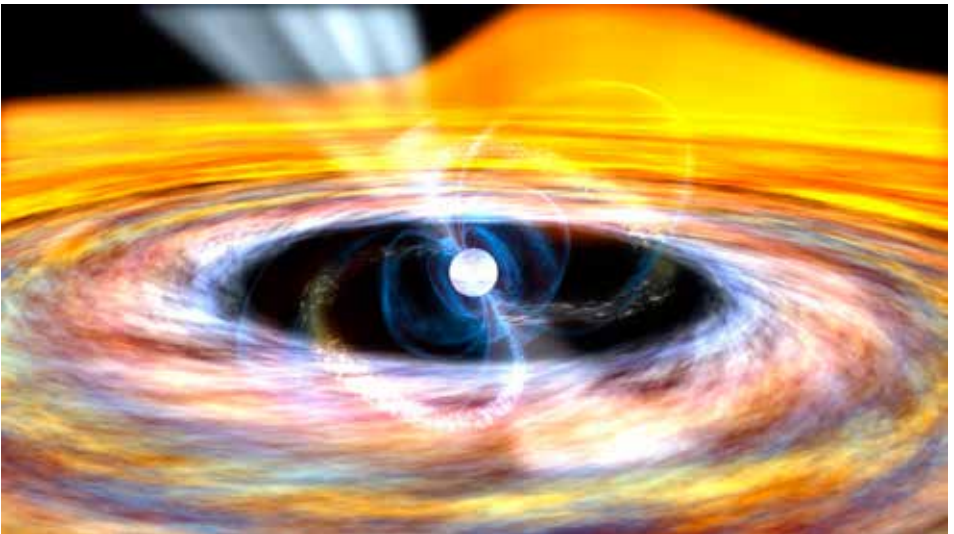
Les CRSF (cyclotron resonant scattering features) sont des caractéristiques spectrales, apparaissant généralement en absorption, dans les spectres de rayons X d'objets contenant des étoiles à neutrons fortement magnétisées. On pense que les CRSF sont dues à la diffusion résonnante de photons par des électrons dans les champs magnétiques forts. Cette signature est comme une sonde qui mesure directement le champ magnétique près de la surface de l'étoile à neutrons.

Le télescope spatial X Insight-HXMT a observé le XRBP GRO J1008-57 lors d'un saut en 2017. Les astronomes y ont détecté une CRSF à l'énergie de 90 keV avec un niveau de signification de plus de 20 sigma (on considère généralement 5  $\sigma$ , voire 3  $\sigma$ , comme suffisants pour une confirmation solide), ce qui a permis

de découvrir un champ magnétique d'environ un milliard de teslas à la surface de l'étoile à neutrons. Il s'agit du champ magnétique le plus puissant détecté de manière convaincante dans l'Univers, un million de fois plus fort que ce qui peut être généré dans les laboratoires terrestres (le record actuel pour un champ contrôlé est de 1 200 teslas).

Insight-HXMT est le premier satellite chinois d'astronomie à rayons X. Il comprend des charges utiles scientifiques, notamment des télescopes à haute, moyenne et basse énergies et un moniteur de l'environnement spatial. Par rapport aux autres satellites à rayons X, Insight-HXMT présente des avantages exceptionnels pour la détection des raies dites « cyclotron » (en particulier aux hautes énergies) grâce à sa couverture spectrale à large bande (1-250 keV), sa grande surface effective aux hautes énergies, sa haute résolution temporelle, son faible temps mort et ses effets d'empilement négligeables pour les sources lumineuses.

*Vue d'artiste d'un pulsar et de son disque d'accrétion.  
(Extrait d'une animation NASA)*



## ***Parallaxes avec New Horizons***

*Basé sur un communiqué NASA*

Pour la première fois, un vaisseau spatial a renvoyé des images du ciel depuis si loin que l'effet de parallaxe est immédiatement perceptible pour certaines étoiles, qui apparaissent dans des positions différentes de celles que nous voyons depuis la Terre.

Les livres d'astronomie présentent parfois l'aspect que le ciel aurait depuis telle ou telle autre étoile, avec des constellations offrant un visage radicalement différent de celui que nous leur connaissons. À sept milliards de kilomètres de la Terre dans sa fuite vers l'espace interstellaire, la sonde New Horizons de la NASA n'est pas encore assez loin pour réussir un tel exploit, il s'en faut de beaucoup. Elle a cependant déjà parcouru une telle distance qu'elle a maintenant une vue différente des étoiles les plus proches et a pu transmettre des photos qui les montrent visiblement déplacées dans le ciel par le phénomène de parallaxe.

Les 22 et 23 avril, le vaisseau spatial a tourné sa caméra télescopique longue portée vers deux des étoiles les plus proches, Proxima Centauri et Wolf 359, pour montrer ce déplacement. Les scientifiques utilisent depuis longtemps cet effet de parallaxe pour mesurer les distances astronomiques (c'est le même effet qui nous permet d'estimer les distances grâce à la vision binoculaire ou aux mouvements).

Une façon simple de voir la parallaxe est de placer un doigt à bout de bras et de le regarder sauter de gauche à droite lorsque vous le regardez successivement de chaque œil. On le réalise également en regardant le paysage défiler lorsque l'on se déplace. De même, lorsque la Terre fait le tour du Soleil, les étoiles changent de position. Mais comme les étoiles les plus proches sont des centaines de milliers de fois plus éloignées que le diamètre de l'orbite terrestre, les décalages dus à la parallaxe sont minuscules et ne peuvent être mesurés qu'avec des instruments précis.

Lorsque les images de New Horizons sont couplées avec des images des mêmes étoiles prises avec des télescopes sur Terre,

le décalage de la parallaxe est instantanément visible. La combinaison donne une vue en 3D des étoiles proches flottant devant celles d'arrière-plan.

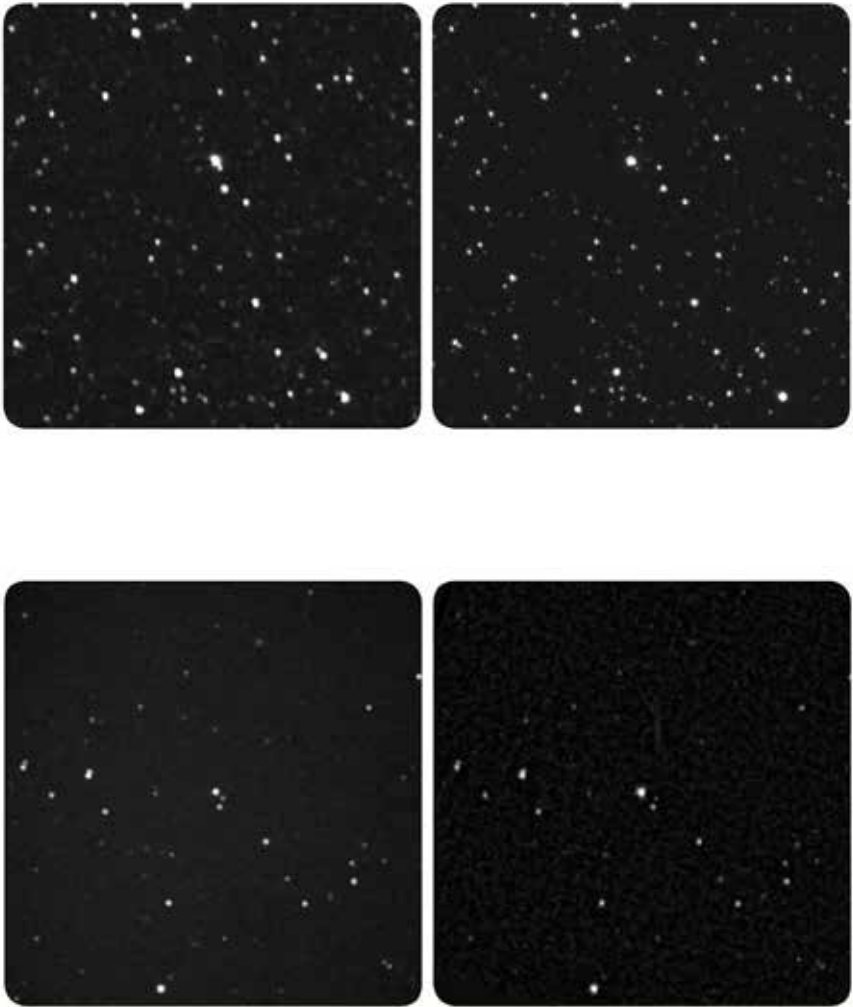
New Horizons nous a habitués à des premières, et celle-ci en est une autre. Lancé en 2006, New Horizons est la première mission vers Pluton et la ceinture de Kuiper. Elle a exploré Pluton et ses lunes en juillet 2015, complétant ainsi la reconnaissance des planètes de l'ère spatiale commencée 50 ans plus tôt, et a poursuivi son voyage d'exploration sans précédent en janvier 2019 avec le survol de l'objet Arrokoth de la ceinture de Kuiper. New Horizons continue de renvoyer de nouvelles données passionnantes pour la science planétaire et finira par quitter le Système solaire, à l'instar des Voyagers et Pioneers sur leur chemin vers les étoiles.

Les images accompagnant Proxima Centauri et Wolf 359 ont été fournies par des télescopes robotiques de l'observatoire de Siding Spring en Australie et de celui du Mont Lemmon en Arizona.

Les communautés d'astronomes professionnels et amateurs attendaient ces données avec impatience et étaient très enthousiastes à l'idée d'écrire une page de l'histoire de l'exploration spatiale. Les images obtenues lorsque New Horizons observait Proxima Centauri et Wolf 359 ont dépassé toutes les attentes.

Le lecteur intéressé par les parallaxes et la stéréoscopie est invité à télécharger ces images sur <http://pluto.jhuapl.edu/Learn/Parallax/Parallax-Images.php> Tout au long de l'histoire, les navigateurs ont utilisé les mesures des étoiles pour établir leur position sur la Terre. Les navigateurs interstellaires pourraient faire de même pour établir leur position dans la Galaxie, en utilisant cette technique dont New Horizons a fait la démonstration.

Au moment des observations, New Horizons se trouvait à plus de 7 milliards de kilomètres de la Terre, une distance qu'un signal radio, voyageant à la vitesse de la lumière, franchit en un peu moins de 6½ heures.



*Le déplacement de Proxima Centauri (en haut) et de Wolf 359 (en bas) entre les images de droite et de gauche permet, en accommodant à l'infini, d'avoir une vue en relief. L'image New Horizons est celle de gauche. (NASA)*

## *Oumuamua*

*Basé sur un communiqué CfA*

La quête des origines et de la structure moléculaire du visiteur interstellaire *Oumuamua* se poursuit avec l'annonce qu'en dépit d'affirmations antérieures l'objet n'est pas fait d'hydrogène moléculaire gelé.

L'étude précédente, publiée après que les observations du télescope spatial Spitzer eurent fixé des limites strictes au dégazage des molécules carbonées, suggérait que si *Oumuamua* était un iceberg d'hydrogène, alors du gaz qui lui donnerait une poussée de type fusée aurait pu échapper à la détection. La proposition semblait prometteuse car elle pouvait expliquer la forme allongée d'*Oumuamua* ainsi que l'accélération non gravitationnelle. Cette théorie est basée sur l'hypothèse que de la glace d'hydrogène pourrait se former dans des nuages moléculaires denses. De tels objets pourraient être abondants dans l'Univers et avoir d'importantes implications. La glace  $H_2$  a également été proposée pour expliquer la matière noire, un des grands mystères de l'astrophysique moderne.

Mais les scientifiques se sont demandé si un objet constitué d'hydrogène aurait réel-

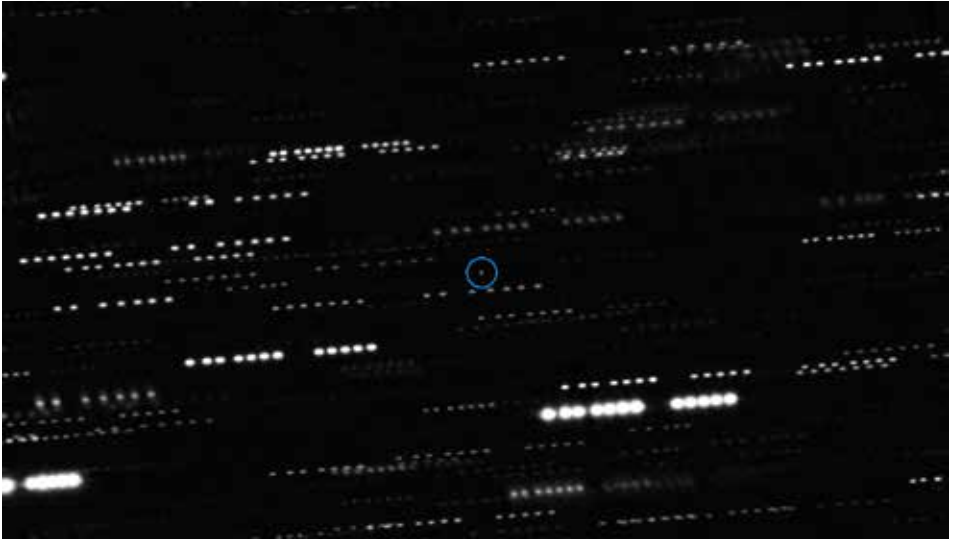
lement pu survivre au voyage de centaines de millions d'années, s'il ne s'évaporerait pas trop rapidement, et même, tout simplement, s'il pourrait se former dans un nuage moléculaire.

Traversant le Système solaire en 2017 à la vitesse de 200 000 km/h, *Oumuamua* a d'abord été classé comme un astéroïde, et quand il a accéléré par la suite, on a découvert qu'il avait des propriétés plus proches de celles des comètes. Mais l'objet interstellaire d'un rayon de 0,2 km n'entraîne pas non plus dans cette catégorie, et son origine est restée un mystère. L'endroit le plus probable pour fabriquer des icebergs d'hydrogène se trouve dans les environnements les plus denses du milieu interstellaire. Ce sont des nuages moléculaires géants, les GMC.

Les chercheurs se sont concentrés sur W51 – l'un des GMC les plus proches à seulement 17 000 années-lumière – comme lieu d'origine potentiel mais ils ont émis l'hypothèse que l'objet n'aurait tout simplement pas

*Oumuamua, le visiteur interstellaire. Impression d'artiste. (The international Gemini Observatory/NOIRLab/NSF/AURA artwork by J. Pollard)*





pu faire le voyage intact. De plus il s'avère que les GMC ne sont pas vraiment propices au développement d'icebergs d'hydrogène.

Une origine possible pour les objets solides est la croissance par agglutinement de poussières mais, dans le cas d'un iceberg d'hydrogène, cette théorie ne semble pas tenir. Pour former un objet de taille kilométrique, il faut d'abord former des grains de la taille du micron, puis ces grains se développent par collisions. Cependant, dans les régions de forte densité, l'échauffement par collisions peut rapidement sublimer le manteau d'hydrogène des grains et les empêcher de croître.

Bien que l'étude ait exploré la destruction de la glace  $H_2$  par de multiples mécanismes, y compris le rayonnement interstellaire, les rayons cosmiques et le gaz interstellaire, la sublimation due au chauffage par la lumière des étoiles a l'effet le plus destructeur, et la sublimation thermique par chauffage par collision dans les GMC pourrait détruire les icebergs d'hydrogène moléculaire de la taille d'ʻOumuamua avant leur fuite dans le milieu interstellaire. Cette conclusion écarte la théorie selon laquelle ʻOumuamua provient d'un GMC, et écarte également la proposition de boules de neige primordiales en tant que matière noire.

*L'astéroïde interstellaire ʻOumuamua. Cette image résulte de la combinaison de multiples clichés pris par le Very Large Telescope de l'ESO ainsi que par le Gemini South Telescope. (ESO/K. Meech et al)*

Le refroidissement par évaporation dans ces situations ne réduit pas le rôle de la sublimation thermique par la lumière des étoiles dans la destruction des objets de glace  $H_2$ .

ʻOumuamua a acquis sa notoriété en 2017 lorsqu'il a été découvert à l'observatoire Haleakalā. Il a fait depuis l'objet d'études continues. L'objet est mystérieux. Il présente des propriétés particulières que l'on n'avait encore jamais vues chez les comètes et astéroïdes du Système solaire.

Bien que la nature du voyageur interstellaire soit actuellement un mystère, les astronomes pensent qu'il ne le restera pas longtemps, surtout si ʻOumuamua fait partie d'une population d'objets similaires sur des trajectoires aléatoires. L'observatoire Vera C. Rubin (VRO), qui devrait avoir sa première lumière l'année prochaine, pourrait détecter en moyenne un objet similaire à ʻOumuamua par mois.

## Nébuleuses planétaires

*Basé sur un communiqué KULeuven*

Les étoiles en fin de vie enflent et se refroidissent pour finalement devenir des géantes rouges. Elles produisent des vents stellaires et perdent ainsi de la masse. Au fur et à mesure que l'étoile évolue, elle se réchauffe à nouveau et son rayonnement excite les couches de matière stellaire éjectées formant une nébuleuse planétaire. Faute d'observations détaillées, les astronomes ont toujours supposé que ces vents étaient sphériques, comme les étoiles qu'ils entourent. En réalité, ces vents stellaires ne sont pas sphériques mais ont une forme similaire à celle des nébuleuses planétaires. Les astronomes en concluent que l'interaction avec une étoile ou une exoplanète qui l'accompagne façonne à la fois les vents stellaires et les nébuleuses planétaires.

Les astronomes ont observé des vents stellaires autour d'étoiles géantes rouges et froides avec l'observatoire ALMA au Chili, le plus grand radiotélescope au monde. Pour la première fois, ils ont rassemblé une vaste collection d'observations détaillées, chacune d'entre elles ayant été réalisée en utilisant exactement la même méthode. Cela a été crucial pour pouvoir comparer directement les données et exclure les biais. Ils ont remarqué que les vents étaient tout sauf symétriques ou ronds.

Certains vents stellaires étaient en forme de disque, d'autres contenaient des spirales et un troisième groupe, des cônes. C'est une indication claire que les formes n'ont pas été créées au hasard. L'équipe s'est aperçue que d'autres étoiles de faible masse ou même des planètes massives situées à proximité de l'étoile mourante étaient à l'origine des différentes formes. Ces compagnes sont trop petites et trop faibles pour être détectées directement. Tout comme une cuillère qui touille une tasse de café avec du lait peut créer un motif en spirale, la compagne aspire de la matière vers elle en tournant autour de l'étoile et façonne le vent stellaire.

L'équipe a transposé cette théorie dans des modèles. La forme des vents stellaires

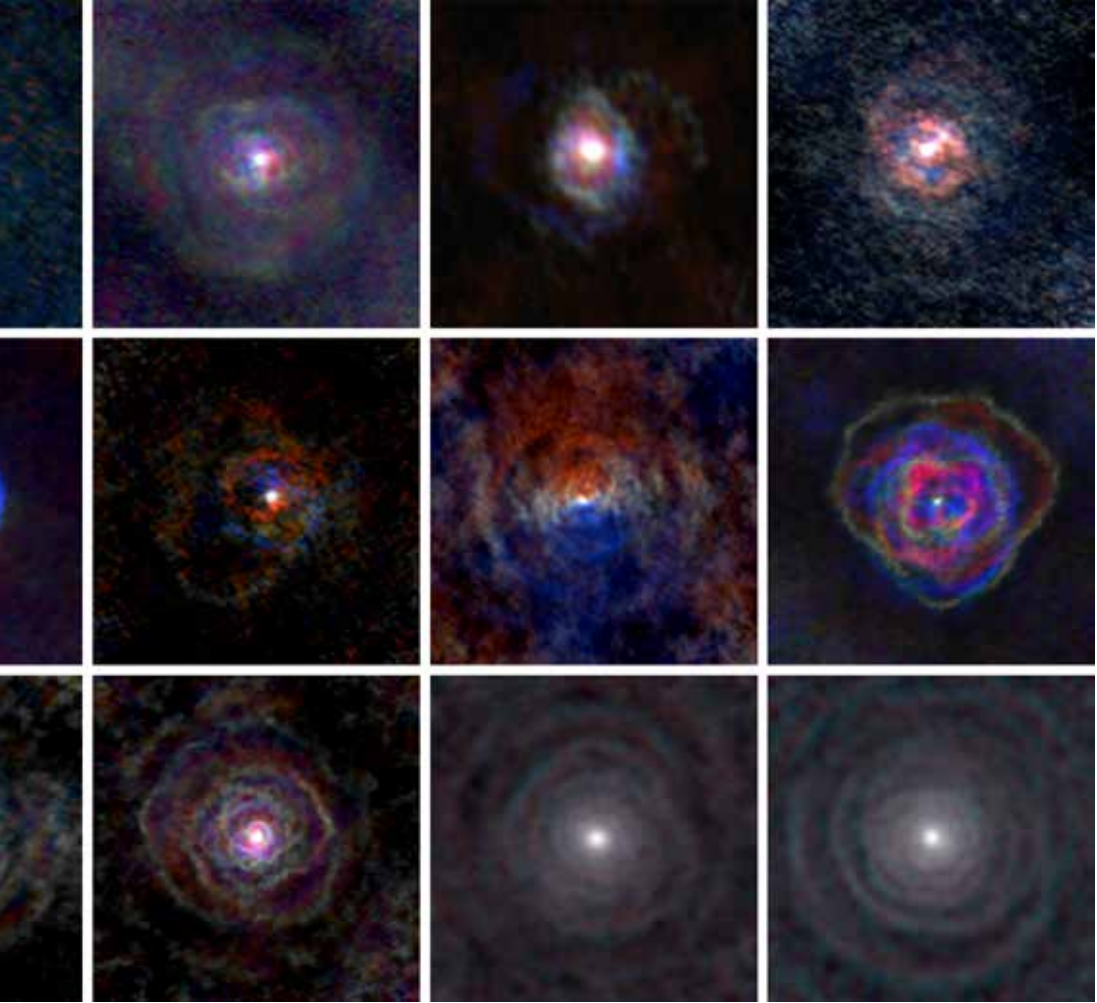
peut être expliquée par la présence de compagnes proches, et la vitesse à laquelle l'étoile froide perd sa masse à cause du vent stellaire est un paramètre important.

Jusqu'à présent, les calculs sur l'évolution des étoiles étaient basés sur l'hypothèse que les étoiles vieillissantes semblables au Soleil ont des vents stellaires sphériques. Comme la complexité des vents stellaires n'était pas prise en compte, toute estimation antérieure du taux de perte de masse des étoiles vieilles pouvait être faussée d'un facteur allant jusqu'à 10. L'équipe mène actuellement des recherches supplémentaires pour voir comment cela pourrait avoir un impact sur les calculs d'autres caractéristiques cruciales de l'évolution stellaire et galactique.

L'étude aide également à imaginer à quoi pourrait ressembler le Soleil lorsqu'il mourra dans 7 milliards d'années. Jupiter ou même Saturne, parce qu'ils ont une si grande masse, vont influencer le fait que le Soleil passera ses derniers millénaires au cœur d'une spirale, d'un papillon, ou de toute autre forme envoûtante que nous voyons dans les nébuleuses planétaires. Les calculs prédisent qu'une spirale va se former dans le vent solaire.

Cette étude fait partie du projet ATOMIUM, qui vise à en apprendre davantage sur la physique et la chimie des vieilles étoiles. Les étoiles vieillissantes sont parfois considé-





rées comme ennuyeuses, mais elles ne le sont pas : elles racontent l'histoire de ce qui vient après. Il a fallu un certain temps pour comprendre que les vents stellaires peuvent avoir la forme de pétales de rose (voir, par exemple, le vent stellaire de R Aquilae), mais, comme l'a dit Antoine de Saint-Exupéry dans *Le Petit Prince* : « C'est le temps que tu as perdu pour ta rose, qui fait ta rose si importante ».

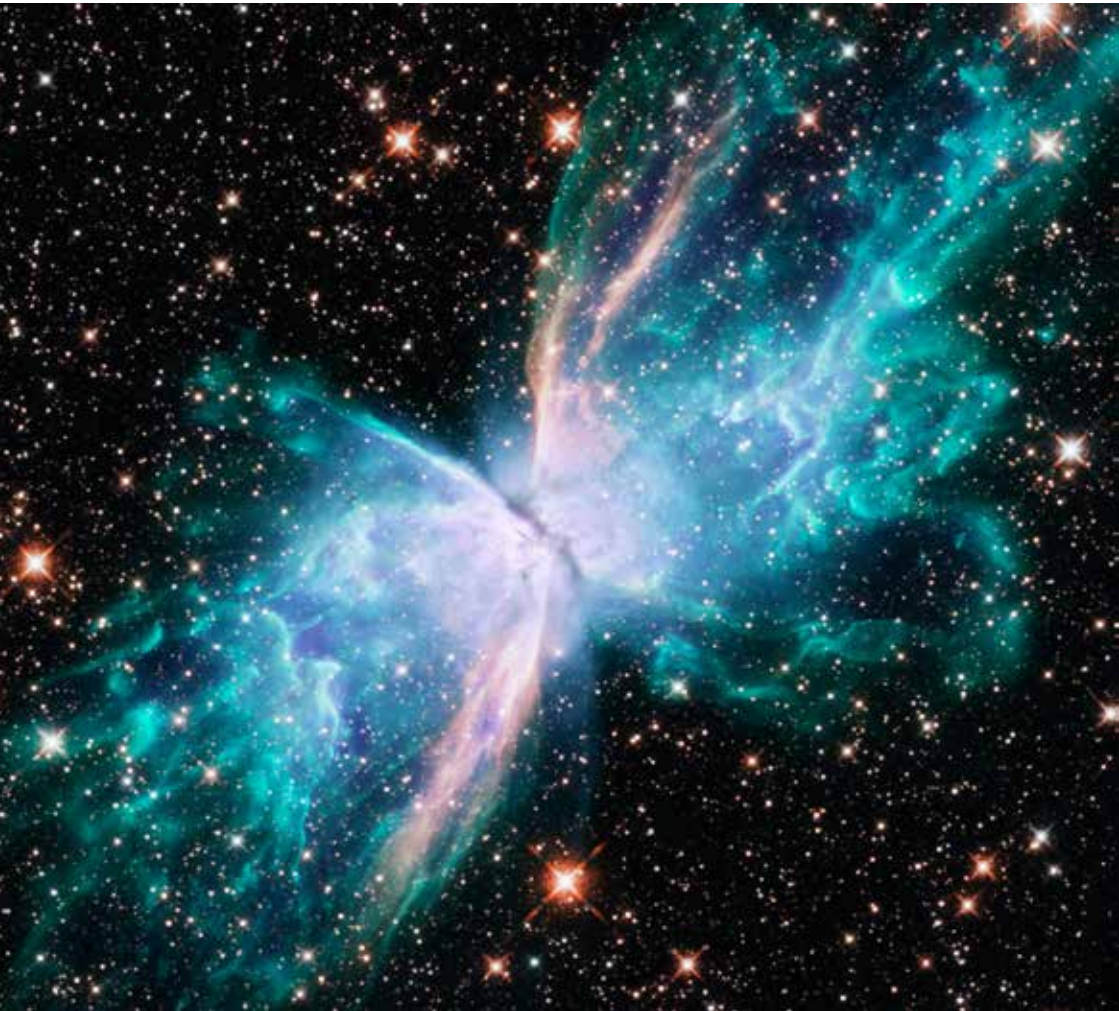
*Portraits de vents autour d'étoiles vieilles. On y voit des morphologies variées, disques, cônes, spirales. La couleur indique la vitesse radiale : le bleu colore la matière qui s'approche, le rouge, celle qui s'éloigne. (L. Decin, ESO/ALMA)*

## ***Les nébuleuses planétaires NGC 6302 et 7027 revisitées par Hubble***

*Basé sur un communiqué NASA*

La plupart des étoiles mènent une vie tranquille pendant des centaines de millions ou des milliards d'années. Mais vers la fin de leur vie, elles peuvent déclencher un véritable spectacle pyrotechnique, en soufflant leur enveloppe et éjectant des jets de gaz chauds. Les astronomes ont utilisé toutes les capacités d'imagerie de

*NGC 6302, la nébuleuse du Papillon, a été observée par Hubble du proche ultraviolet au proche infrarouge. Les observations mettent en évidence l'émission du fer ionisé qui forme un motif en « S » du bas à gauche de l'image au haut à droite. Cette émission de gaz du système stellaire central, qui se déplacent à des vitesses bien plus élevées que la matière expulsée précédemment. L'étoile ou les étoiles centrales ont périodiquement rejeté des couches de gaz au cours des deux derniers millénaires. Les « ailes » de NGC 6302 sont des régions de gaz très chaud se mouvant à plus d'un million de kilomètres par heure. NGC 6302 se trouve entre 2 500 et 3 800 années-lumière dans la constellation du Scorpion. (NASA, ESA et J. Kastner/RIT)*





Hubble pour disséquer deux témoins de tels événements, des nébuleuses planétaires.

NGC 6302 est surnommée la nébuleuse Papillon en raison de son apparence en ailes déployées. Quant à NGC 7027, elle doit son sobriquet anglo-saxon de Jewell Bug à sa ressemblance à une punaise aux couleurs étincelantes (famille des Scutelleridae).

Les chercheurs ont découvert une complexité sans précédent et des changements rapides dans les jets et les nuages de gaz expulsés par les étoiles centrales.

Ces nouvelles observations Hubble multi-longueurs d'onde fournissent la vue la plus complète à ce jour de ces deux nébuleuses spectaculaires. Elles aident les chercheurs à retracer l'histoire des ondes de choc des nébuleuses. De tels chocs sont généralement

*L'étoile centrale de NGC 7027 a été identifiée dans le proche ultraviolet grâce au télescope spatial Hubble. Les observations dans le proche ultraviolet devraient permettre d'estimer la quantité de poussière qui obscurcit l'étoile et la température réelle de l'étoile. En comparant avec d'anciennes observations de Hubble, les chercheurs peuvent aussi étudier l'objet au fur et à mesure de son évolution dans le temps.*

*Cette nébuleuse résulte d'éjections de matière, probablement par un système binaire en orbite serrée. D'abord relativement lentes pendant des milliers d'années, ces éjections se sont faites plus violentes et plus concentrées. NGC 7027 se trouve à environ 3 000 années-lumière dans la constellation du Cygne. (NASA, ESA et J. Kastner/RIT)*

engendrés lorsque des vents stellaires rapides balayent les gaz et poussières plus lents éjectés par l'étoile dans son passé récent, générant des cavités en forme de bulles aux parois bien définies. Les chercheurs soupçonnent qu'au cœur des deux nébuleuses se trouvent – ou se trouvaient – deux étoiles tournant l'une autour de l'autre, comme un couple de patineurs. La preuve de l'existence d'un tel duo central provient des formes bizarres de ces nébuleuses. Chacune a une taille pincée et des lobes polaires ainsi que d'autres motifs symétriques plus complexes.

Une théorie pour expliquer de telles structures dans les nébuleuses planétaires est que la matière perdue par une étoile du couple se répand en un disque autour d'une ou des deux étoiles. Ce disque est la source de la matière qui est éjectée dans des directions opposées.

La plus petite étoile de la paire peut fusionner avec son compagnon stellaire, lorsque celui-ci, évoluant plus rapidement, se met à enfler.

Les jets de matière créent un motif symétrique, comme celui qui a donné à NGC 6302 son surnom de papillon. De tels écoulements sont couramment observés dans les nébuleuses planétaires.

Les compagnes présumées des étoiles centrales de NGC 6302 et NGC 7027 n'ont pas été directement détectées parce qu'elles sont trop proches d'étoiles géantes rouges plus grandes, un type d'étoiles des centaines ou des milliers de fois plus brillantes que le Soleil, ou peut-être parce qu'elles ont déjà été avalées par celles-ci.

L'hypothèse de la fusion des étoiles semble être la meilleure et la plus simple explication des caractéristiques observées dans les nébuleuses planétaires les plus actives et les plus symétriques. C'est un concept unificateur puissant, jusqu'à présent sans rival.

Imaginez un arroseur de pelouse qui tourne en rond envoyant deux jets en « S ». Au début, cela semble chaotique, mais si vous le fixez un moment, vous pouvez en retracer les

motifs. La même forme en S est présente dans la nébuleuse Papillon. Le S n'apparaît que dans les images prises par Hubble dans une longueur d'onde de l'infrarouge proche correspondant aux atomes de fer une fois ionisés.

Cette émission en S du fer de la nébuleuse trace directement les éjections les plus récentes de la région centrale, puisque les collisions au sein de la nébuleuse sont particulièrement violentes dans ces régions spécifiques de NGC 6302. Elle constitue un traceur des collisions énergétiques entre les vents lents et les vents rapides provenant des étoiles. Elle est couramment observée dans les restes de supernova et les noyaux galactiques actifs et dans les jets sortants des étoiles naissantes, mais elle est très rarement observée dans les nébuleuses planétaires.

Le fait que l'émission de fer n'apparaisse que dans ces directions opposées et décentrées implique que sa source oscille au cours du temps comme une toupie sur le point de tomber. C'est un signe révélateur de la présence d'un disque et aussi d'une compagne stellaire.

La nébuleuse planétaire NGC 7027, quant à elle, a créé des formes calmes, sphériques, symétriques ou peut-être en spirale pendant des siècles – jusqu'à une date relativement récente. À certains égards, les changements au sein de cette nébuleuse sont encore plus spectaculaires que ceux de NGC 6302. Quelque chose s'est récemment détraqué en son centre, produisant un nouveau motif de trèfle, avec des bulles de matière qui se déplacent dans des directions spécifiques.

Les nouvelles images de NGC 7027 prises par les chercheurs montrent une émission de fer ionisé qui ressemble beaucoup aux observations faites par l'observatoire X Chandra de la NASA en 2000 et 2014. L'émission de fer retrace les écoulements orientés du sud-est vers le nord-ouest qui produisent également les chocs vus par Chandra dans le domaine X. Cette nébuleuse est probablement un bel exemple de ce qui se passe lorsqu'une étoile géante rouge avale sa compagne.

## ***Pulsar jeune***

*Basé sur un communiqué ESA*

Les pulsars comptent parmi les objets les plus étranges de l'Univers. Les étoiles massives meurent dans de violentes explosions de supernova et laissent derrière elles ces restes stellaires compacts, chauds et magnétisés. Parfois, les pulsars connaissent des périodes d'activité intense et émettent d'énormes quantités de rayonnements énergétiques sur des périodes allant de quelques millisecondes à plusieurs années. De courtes rafales annoncent souvent une explosion plus intense, lorsque l'émission de rayons X peut augmenter d'un facteur mille. Une campagne d'observation impliquant plusieurs instruments et menée par l'équipe du télescope spatial XMM-Newton a permis de capturer une telle explosion émanant du pulsar Swift J1818.0-1607 découvert en mars.

Non seulement ce pulsar est le plus jeune des 3 000 connus dans notre galaxie, mais il appartient à une catégorie très rare, les magnétars, les astres ayant les champs magnétiques les plus forts.

Swift J1818.0-1607 se trouve à environ 15 000 années-lumière. Sa masse est deux fois celle du Soleil et est condensée dans un diamètre de seulement 25 kilomètres.

Nos ancêtres auraient pu voir l'explosion de la supernova qui a formé ce bébé magnétar il y a environ 240 ans, en plein milieu des révolutions américaine et française.

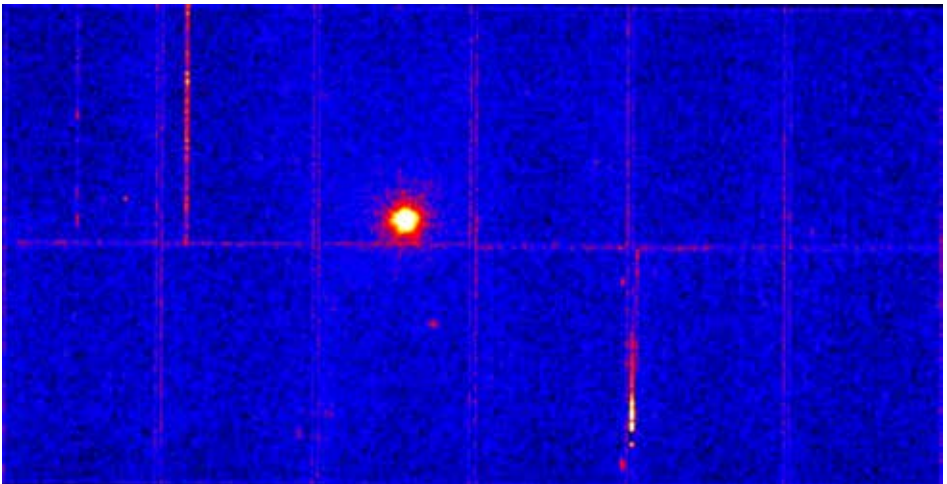
Ce magnétar mérite d'autres superlatifs. C'est par exemple l'un des objets qui tournent le plus rapidement, une fois toutes les 1,36 secondes.

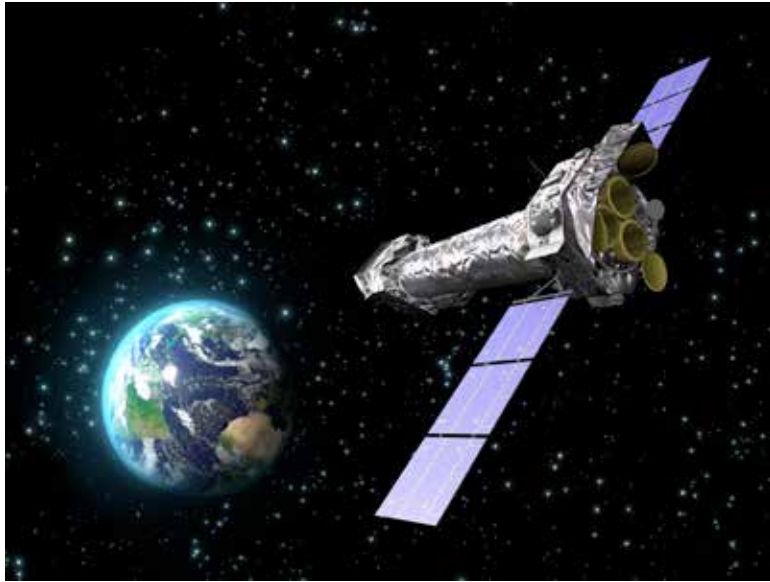
Immédiatement après sa découverte, les astronomes ont scruté Swift J1818.0-1607 avec assiduité à l'aide de XMM-Newton, des satellites X Swift et NuSTAR et du radiotélescope de Sardaigne.

Contrairement à la plupart des magnétars, qui ne sont observables qu'en rayons X, les observations ont révélé que Swift J1818.0-1607 est l'un des très rares à montrer également une émission pulsée dans les ondes radio.

Les magnétars, un type de pulsars particulièrement magnétisés, semblent rares – on n'en connaît encore qu'une trentaine – et sont

***Image composite de Swift J1818.0-1607 – le plus jeune pulsar jamais observé – par la caméra EPIC-pn du satellite XMM-Newton de l'ESA. L'image combine des observations dans les bandes d'énergie suivantes : 2-4 keV (rouge), 4-7,5 keV (vert) et 8,5-12 keV (bleu). (ESA)***





*Le télescope spatial  
XMM-Newton.  
Vue d'artiste.  
(ESA)*

supposés être distincts des autres types de pulsars qui se manifestent fortement dans les émissions radio. Mais les chercheurs soupçonnent depuis longtemps que les magnétars pourraient être beaucoup plus courants qu'on ne l'imagine. Cette nouvelle découverte soutient l'idée qu'ils pourraient représenter une fraction substantielle des pulsars. Le fait qu'un magnétar se soit formé aussi récemment en est une autre indication.

Il est probable que les magnétars échappent aux observations lorsqu'ils sont en dormance, et qu'ils ne sont découverts qu'à leur réveil, comme ce fut le cas pour Swift J1818.0-1607.

En outre, il n'y a peut-être pas une aussi grande diversité de pulsars qu'on le pensait. Les phénomènes supposés distinctifs présentés par les magnétars peuvent également se manifester dans d'autres types de pulsars. Et l'émission radio de Swift J1818.0-1607 n'est pas une caractéristique spécifique des magnétars.

Bien qu'intéressants en eux-mêmes, les magnétars sont pertinents à une échelle

beaucoup plus large : ils pourraient jouer un rôle clé dans la conduite de toute une série d'événements transitoires observés dans l'Univers. On pense que ces événements sont d'une manière ou d'une autre liés aux magnétars, soit pendant leur naissance, soit au tout début de leur vie, ce qui rend cette découverte particulièrement passionnante. Parmi les exemples d'événements transitoires, on peut citer les sursauts de rayons gamma (GRB), les supernovæ super-lumineuses et les mystérieux éclats radio FRB. Ces événements énergétiques sont potentiellement liés à la formation et à l'existence de jeunes objets fortement magnétisés comme Swift J1818.0-1607.

Pour déterminer l'âge de ce magnétar, les chercheurs avaient besoin de mesures à long terme et à haute résolution de la vitesse de rotation et de l'évolution de cette rotation dans le temps. La caméra EPIC de XMM-Newton a pu observer Swift J1818.0-1607 juste trois jours après sa découverte, ce qui a permis aux chercheurs d'avoir une image précise en rayons X et de caractériser sa rotation et son spectre.

## ***Supernovæ naines noires***

*Basé sur un communiqué Illinois State University*

La fin de l'Univers tel que nous le connaissons ne se fera pas en un claquement de doigts. La plupart des étoiles vont très, très lentement s'éteindre lorsque leur température diminuera, mais ce processus sera ponctué de frémissements inattendus.

On pense souvent que tout sera sombre lorsque l'Univers prendra fin. C'est ce qu'on appelle la mort thermique, lorsque l'Univers sera principalement constitué de trous noirs et de cendres d'étoiles. La noirceur pourrait être ponctué par des feux d'artifice d'explosions des restes d'étoiles qui ne sont pas censées exploser. De nouveaux travaux théoriques montrent que de nombreuses naines blanches pourraient exploser en supernovæ dans un avenir lointain, bien après la mort de tout le reste de l'Univers.

Dans l'Univers actuel, la mort d'étoiles massives dans les explosions de supernovæ survient lorsque des réactions nucléaires internes produisent du fer. Le fer ne peut pas être brûlé par les étoiles – il s'accumule comme un poison, déclenchant finalement l'effondrement de l'étoile. Mais les petites étoiles ont tendance à mourir plus paisiblement en rétrécissant et en devenant des naines blanches.

Les étoiles de moins de 10 fois la masse du Soleil n'ont pas la gravité ni la densité nécessaires pour produire du fer dans leur noyau comme le font les étoiles massives, elles ne peuvent donc pas exploser. Au fur et à mesure que les naines blanches se refroidissent au cours des prochains billions d'années, elles s'assombriront, finiront par geler et deviendront des étoiles naines noires.

Comme les naines blanches d'aujourd'hui, elles seront principalement composées d'éléments légers comme le carbone et l'oxygène et auront la taille de la Terre mais contiendront à peu près autant de masse que le Soleil, leur intérieur étant

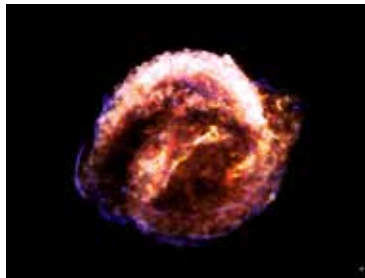
comprimé à des densités des millions de fois supérieures à tout ce qui existe sur Terre.

Mais ce n'est pas parce qu'elles sont froides que les réactions nucléaires s'arrêtent totalement. Les étoiles brillent à cause de la fusion thermonucléaire : elles sont assez chaudes pour briser les petits noyaux et en faire de plus gros, ce qui libère de l'énergie. Les naines blanches sont des cendres, elles sont brûlées, mais les réactions de fusion peuvent encore se produire beaucoup plus lentement à cause de l'effet tunnel. La fusion se produit, même à température zéro. Elle prend beaucoup, beaucoup de temps...

Les supernovæ naines noires pourraient être les dernières choses intéressantes à se produire dans l'Univers. La première se produira dans environ  $10^{100}$  années. Toutes les naines noires n'exploseront pas. Seules les plus massives, environ 1,2 à 1,4 fois la masse du Soleil, le feront. Cela signifie que jusqu'à 1 % de toutes les étoiles qui existent aujourd'hui peuvent s'attendre à mourir de cette façon. Quant aux autres, elles resteront des naines noires. Même avec des réactions nucléaires très lentes, le Soleil n'a pas assez de masse pour exploser en supernova, même dans un futur lointain. On pourrait d'ailleurs le transformer complètement en fer sans qu'il explose.

Les naines noires les plus massives exploseront en premier, suivies par des étoiles de moins en moins massives, jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de naines à exploser après environ  $10^{32000}$  ans. À ce moment-là, l'Univers pourrait être vraiment mort et silencieux.

Au moment où les premières naines noires exploseront, l'Univers sera déjà méconnaissable. Les galaxies se seront dispersées, les trous noirs se seront évaporés, et l'expansion de l'Univers aura entraîné tous les objets restants si loin les uns des autres qu'aucun ne verra jamais les autres exploser. Il ne sera même pas physiquement possible pour la lumière de voyager aussi loin.



(NASA/CXC/Univ of Texas)

## **GW190814**

*Basé sur un communiqué LIGO-Caltech*

L'événement GW190814 observé par les détecteurs LIGO-Virgo correspond à la fusion d'un trou noir de 23 masses solaires et d'un objet de 2,6 masses solaires. Les scientifiques hésitent pour déclarer le second objet comme étant l'étoile à neutrons la plus lourde connue ou le trou noir le plus léger connu.

À la fin de leur vie les étoiles très massives s'effondrent sous leur poids et laissent derrière elles des trous noirs. Les étoiles un peu moins massives, quant à elles, explosent en supernovæ et font place à des étoiles à neutrons.

L'écart de masse entre les étoiles à neutrons les plus massives ( $2,5 \times$  le Soleil) et les plus petits trous noirs ( $5 \times$  le Soleil) est surprenant et les astronomes ont longtemps cherché le chaînon manquant.

Un pas a été fait grâce à la détection de l'événement gravitationnel GW190814 par les observatoires LIGO et Virgo. À 800 millions d'années-lumière, un objet compact de 2,6 masses solaires avait fusionné avec un trou noir de 23 masses solaires, générant une vague d'ondes gravitationnelles. On ne sait pas si le premier objet est l'étoile à neutrons la plus lourde connue ou le trou noir le plus léger connu, mais dans les deux cas, il bat un record et réduit l'écart séparant les deux types d'astres – légèrement s'il s'agit d'une étoile à neutrons, et totalement s'il s'avère être un trou noir.

Le fossé de masse peut en fait ne pas exister du tout mais être simplement dû aux limites des capacités d'observation.

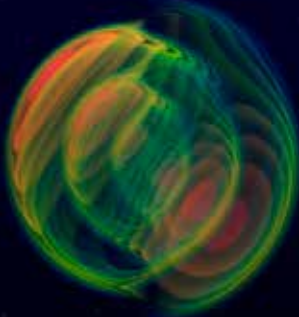
Avant que les deux objets ne fusionnent, leurs masses différaient d'un facteur 9, ce qui en fait le rapport de masse le plus extrême connu pour un événement d'ondes gravitationnelles. Un autre événement LIGO-Virgo récemment rapporté, GW190412, s'est produit entre deux trous noirs avec un rapport de masse d'environ 4 : 1.

Les modèles théoriques actuels peinent à fusionner des objets compacts avec de telles différences de masses, et avec l'objet léger situé dans le « gap » massique. Cette découverte implique que ces événements se produisent beaucoup plus souvent que prévu.

L'objet mystérieux pourrait être une étoile à neutrons, une possibilité passionnante car sa masse dépasserait les prévisions théoriques concernant la masse maximale des étoiles à neutrons. S'il était un trou noir, ce serait tout aussi passionnant puisqu'il serait deux fois plus léger que le plus petit trou noir connu.

Dès l'annonce de la détection par LIGO et Virgo, des dizaines de télescopes terrestres et spatiaux se sont mis en branle pour capter des ondes lumineuses générées par l'événement, mais aucun n'a vu quoi que ce soit. De telles contreparties lumineuses n'ont été vues qu'une seule fois, lors de l'événement GW170817 qui impliquait deux étoiles à neutrons. La grande majorité des événements

*Simulation d'une fusion de trou noir avec des masses asymétriques et une précession orbitale, en accord avec GW190412. (N. Fischer, H. Pfeiffer, A. Buonanno/MPIPG, SXS Collaboration)*



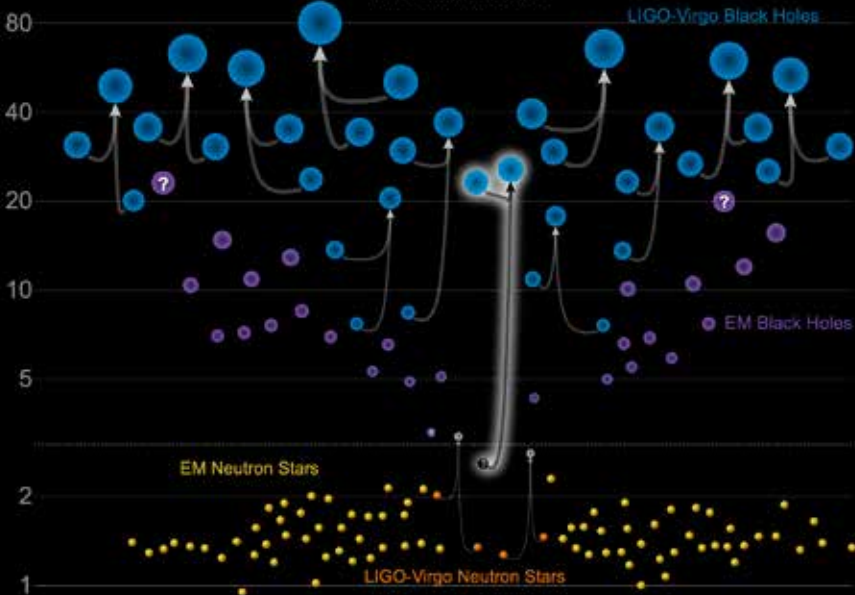
observés jusqu'à présent sont des fusions de trous noirs et, généralement, elles ne produisent pas de lumière. L'absence de contrepartie optique pour GW190412 pourrait donc s'expliquer s'il s'agissait de deux trous noirs. Elle pourrait aussi s'expliquer par la distance, cet événement étant six fois plus lointain que celui de 2017. Une troisième possibilité est que, si l'objet léger était une étoile à neutrons, celle-ci se serait fait avaler en une bouchée par le trou noir neuf fois plus massif, ce qui se serait passé sans émission lumineuse.

Saura-t-on jamais si l'objet mystérieux était une étoile à neutrons ou un trou noir ? Les observations futures avec LIGO, Virgo, et peut-être d'autres télescopes, pourraient détecter des événements similaires qui aideraient à révéler si d'autres objets existent dans le gap des masses – une toute nouvelle population d'objets binaires compacts.

*Cimetière stellaire. Les trous noirs détectés par des observations électromagnétiques sont représentés en violet, ceux mesurés par des observations d'ondes gravitationnelles sont en bleu. Les étoiles à neutrons détectées par des observations électromagnétiques sont en jaune et celles révélées par des ondes gravitationnelles en orange. GW190814, au milieu du graphique, résulte de la fusion d'un trou noir et d'un objet mystérieux dont la masse est environ 2,6 fois celle du Soleil. (LIGO-Virgo/ Frank Elavsky & Aaron Geller/Northwestern)*

## Masses in the Stellar Graveyard

in Solar Masses



Updated 2020-05-16

LIGO-Virgo | Frank Elavsky, Aaron Geller | Northwestern

## **Tempêtes de Jupiter**

*Basé sur un communiqué Caltech*

Avec ses bandes colorées et son immense tache rouge, Jupiter est déjà bien spectaculaire. Que dire alors des tempêtes tourbillonnantes disposées selon un schéma géométrique en ses pôles? Depuis qu'elles ont été repérées pour la première fois par la sonde spatiale Juno de la NASA en 2019, ces tempêtes sont un mystère pour les scientifiques. Les tempêtes sont analogues aux ouragans sur Terre. Cependant, sur notre planète, les ouragans ne se rassemblent pas aux pôles et ne tournent pas les uns autour des autres en forme de pentagones ou d'hexagones.

Des chercheurs ont découvert les raisons de ce comportement étrange. Ils l'ont fait en se basant sur les travaux de Lord Kelvin, un physicien, ingénieur et mathématicien britannique, il y a près de 150 ans.

Les tempêtes de Jupiter sont remarquablement similaires à celles qui s'abattent sur la côte est des États-Unis chaque été et chaque automne, mais à une échelle beaucoup plus grande. Comme sur Terre, les tempêtes de Jupiter ont tendance à se former plus près de l'équateur puis à dériver vers les pôles. Cependant, alors que les ouragans et les typhons de la Terre se dissipent avant de s'aventurer trop loin de l'équateur, sur Jupiter ils continuent à avancer jusqu'à atteindre les pôles.

La différence est que sur la Terre, les ouragans, qui ont besoin de la chaleur de l'eau, finissent par se heurter à des continents. Jupiter n'a pas de surface solide, juste du gaz sous les nuages et elle bénéficie d'un reliquat de chaleur provenant de sa formation comparable à la chaleur qu'elle reçoit du Soleil. La différence de température entre son équateur et ses pôles n'est donc pas aussi grande que sur la Terre.

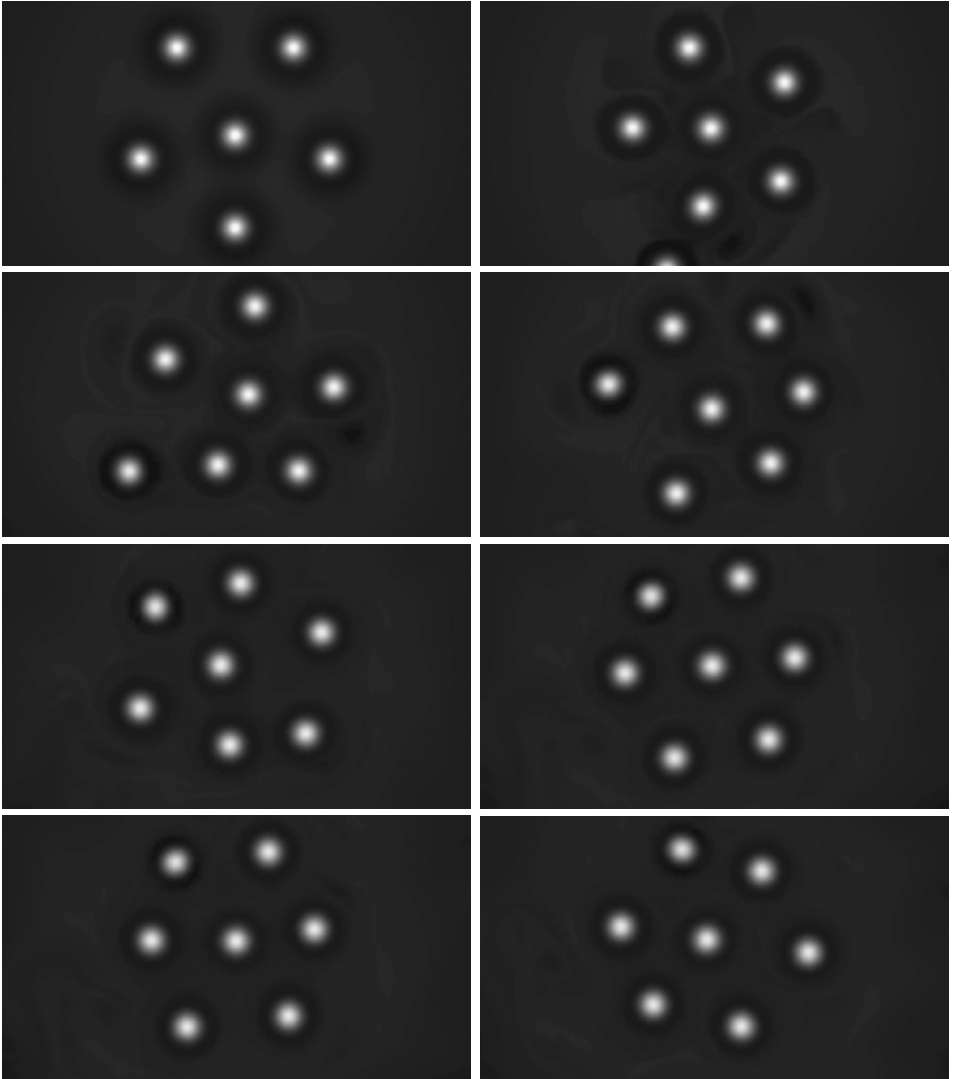
Cependant, cette explication ne rend pas compte du comportement des tempêtes une fois qu'elles ont atteint le pôle sud – comportement inhabituel, même comparé aux autres géantes gazeuses. Ainsi Saturne a une énorme tempête à chacun de ses pôles, plutôt qu'un ensemble de tempêtes disposées géométriquement.



*Le système de cyclones observé en infrarouge par Juno au-dessus du pôle nord de Jupiter. Le cyclone central est entouré de huit autres de diamètres allant de 4 000 à 4 600 kilomètres. (NASA/JPL-Caltech/SwRI/ASI/INAF/JIRAM)*

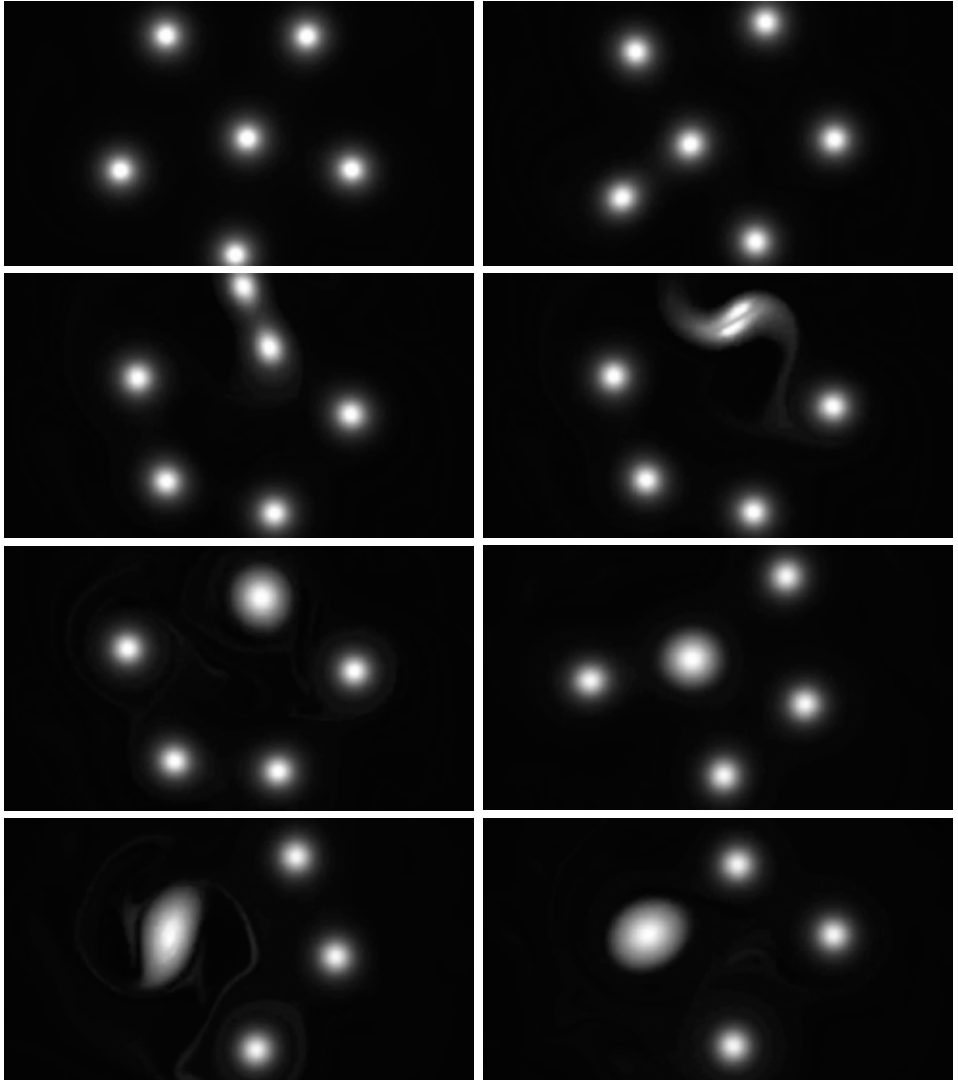
La clé de l'énigme pourrait se trouver dans le passé, notamment dans les travaux menés en 1878 par Alfred Mayer, un physicien américain, et Lord Kelvin. Mayer avait placé des aimants circulaires flottants dans un bassin d'eau et avait observé qu'ils s'arrangeaient spontanément en configurations géométriques, semblables à celles observées sur Jupiter, avec des formes qui dépendaient du nombre d'aimants. Kelvin a utilisé les observations de Mayer pour développer un modèle mathématique expliquant ce comportement. Il y a eu beaucoup d'études en laboratoire de ces polygones fluides, mais personne n'avait encore pensé à appliquer cela à une surface planétaire.

Pour ce faire, les chercheurs ont utilisé un ensemble d'équations connues sous le nom d'« équations d'eau peu profonde » pour construire un modèle informatique de ce qui pourrait se passer sur Jupiter et ont réalisé des simulations afin de déterminer les paramètres



qui rendent les cyclones stables. Il apparaît qu'un arrangement géométrique stable de tempêtes comme sur Jupiter peut se former si chacune d'elles est entourée d'un anneau de vents tournant dans la direction opposée à la rotation des tempêtes – un anneau anticyclonique.

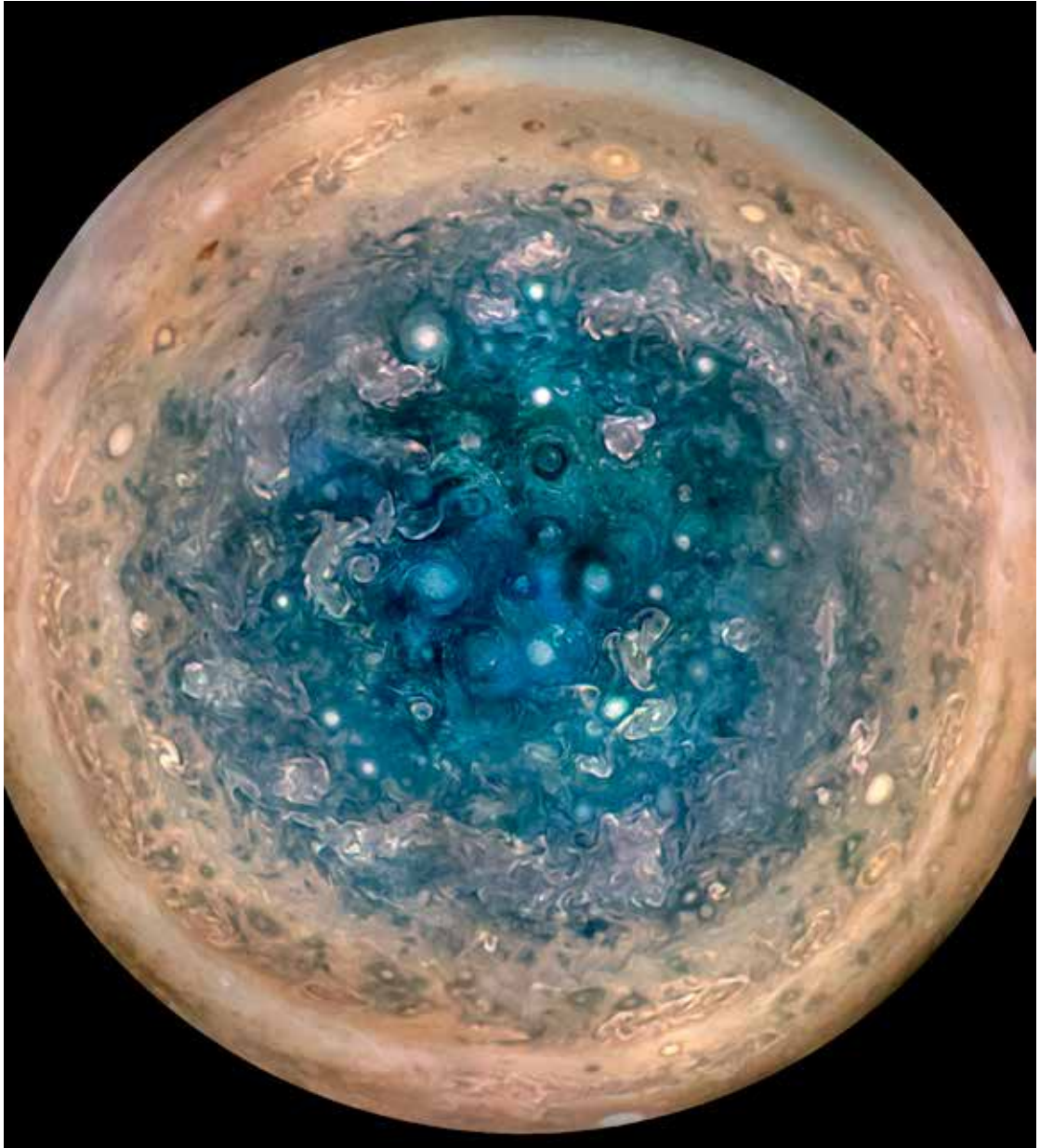
*Cette séquence extraite d'une animation montre des tempêtes qui tournent les unes autour des autres et se repoussent. Dans certaines conditions expérimentales, et sur Jupiter, les tempêtes cycloniques se repoussent les unes les autres plutôt que de fusionner.*  
(Ingersoll et al., Caltech)



La présence d’anneaux anticycloniques fait que les tempêtes se repoussent les unes les autres, plutôt que de fusionner.

Les autres planètes présentent un éventail de comportements beaucoup plus large que sur Terre. De telles recherches pourraient nous aider à tester les théories et, in fine, à mieux comprendre notre météo.

*Dans certaines conditions simulées, comme sur Saturne, les tempêtes cycloniques fusionnent les unes avec les autres au lieu de se repousser.*  
*(Ingersoll et al., Caltech)*



*Le pôle sud de Jupiter vu par Juno d'une altitude de 52 000 kilomètres.  
(NASA/JPL-Caltech/SwRI/MSSS/Betsy Asher Hall/Gervasio Robles)*

## ***FRB et magnétar***

*Basé sur un communiqué ESA*

Un ensemble de télescopes, dont l'observatoire spatial INTEGRAL de l'ESA, a permis de détecter toute une gamme de rayonnements en provenance d'une étoile morte de notre galaxie – une première qui pourrait résoudre un vieux mystère cosmique.

Cette découverte implique deux types de phénomènes cosmiques intéressants : les magnétars et les sursauts FRB (Fast Radio Bursts). Les magnétars sont des restes d'étoiles dont les champs magnétiques sont parmi les plus intenses de l'Univers. Lorsqu'ils s'activent, ils peuvent produire de courtes salves de rayonnement de haute énergie qui durent généralement moins d'une seconde mais sont des milliards de fois plus lumineuses que le Soleil.

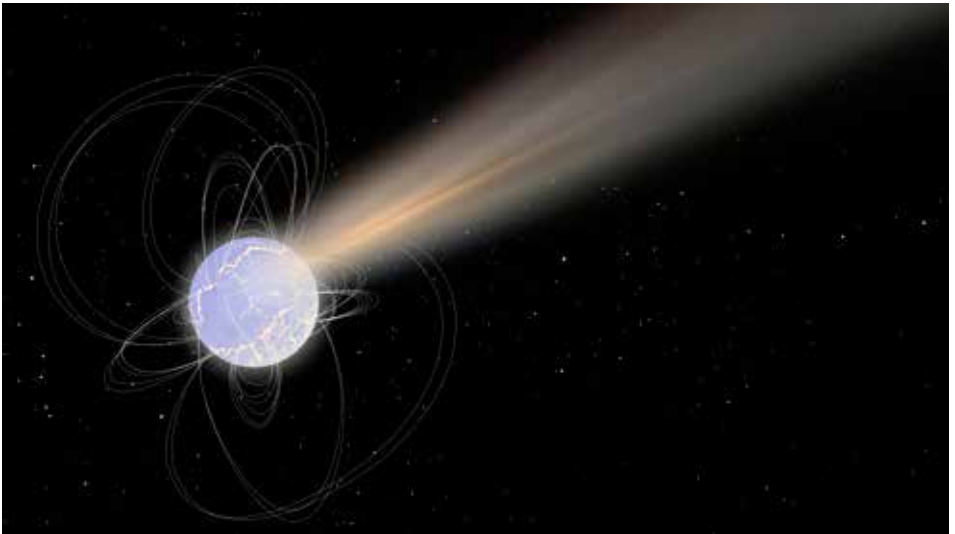
Les sursauts radio FRB sont l'un des principaux mystères de l'astronomie. Découverts en 2007, ces phénomènes se traduisent par des impulsions radio de quelques millisecondes seulement avant de s'estomper, et ne sont que rarement revus. Leur véritable nature reste inconnue, et aucune rafale de ce type n'avait jamais été observée dans la Voie

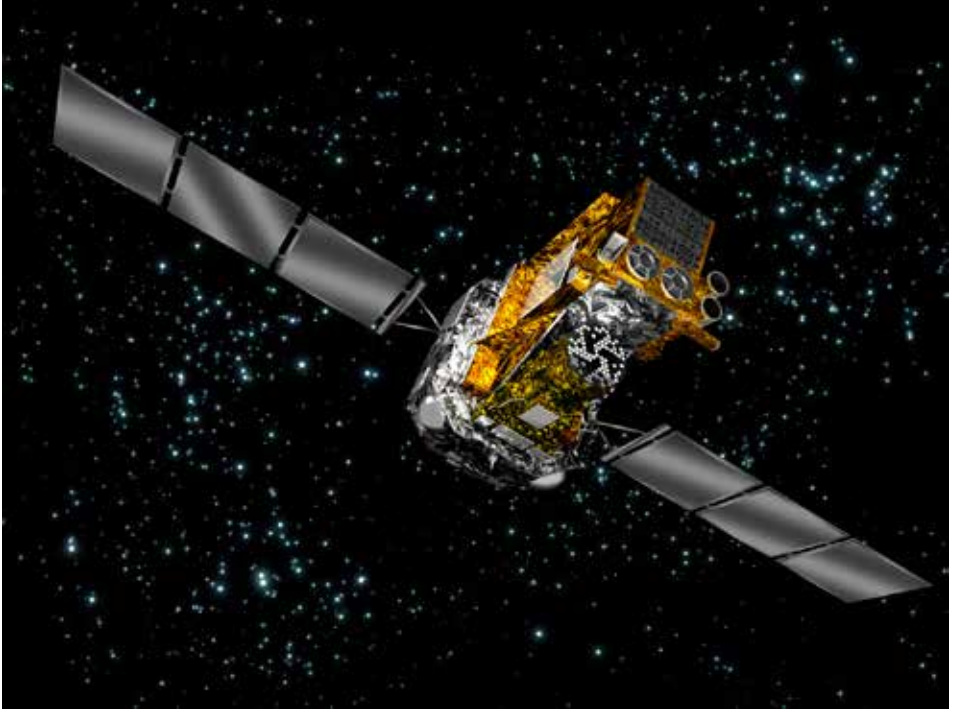
lactée, avec une origine connue, ni dans un autre domaine de rayonnement que les ondes radio – jusqu'à présent.

Fin avril, SGR 1935+2154, un magnétar découvert il y a six ans dans la constellation de Vulpecula suite à un important sursaut de rayons X, est redevenu actif. Peu de temps après, les astronomes ont découvert quelque chose d'étonnant : ce magnétar n'émettait pas seulement ses rayons X habituels, mais aussi des ondes radio.

Au moment de l'explosion, le magnétar se trouvait dans le champ de vision de 30 degrés sur 30 degrés de l'instrument IBIS, ce qui a conduit à une détection automatique par le logiciel du système d'alerte du satellite. Ce système a automatiquement prévenu les observatoires du monde entier de la découverte en quelques secondes seulement, ce qui a permis à la communauté scientifique d'agir rapidement et d'explorer cette source plus en détail.

*Vue d'artiste du magnétar SGR 1935+2154. Découvert en 2014 dans Vulpecula, il est redevenu actif en avril 2020 et a pu être observé non seulement en X mais aussi en radio. (ESA)*





*Le télescope spatial INTEGRAL, lancé en 2002, transporte une suite de quatre instruments capables d'observer et de prendre des images simultanées d'objets cosmiques en rayons gamma, en rayons X et en lumière visible.*  
(ESA/Medialab)

Dans le même temps, le spectromètre embarqué sur INTEGRAL (SPI) a détecté la rafale de rayons X. Il en fut de même pour le télescope spatial chinois Insight (HXMT, Hard X-ray Modulation Telescope).

Les astronomes ont repéré une rafale courte et extrêmement brillante d'ondes radio provenant de la direction de SGR 1935+2154 en utilisant le radiotélescope CHIME au Canada le même jour. Ceci a été confirmé indépendamment quelques heures plus tard par le Survey for Transient Astronomical Radio Emission 2 (STARE2) aux États-Unis.

Aucun sursaut radio, ressemblant à un Fast Radio Burst, n'avait encore été décelé en provenance d'un magnétar connu.

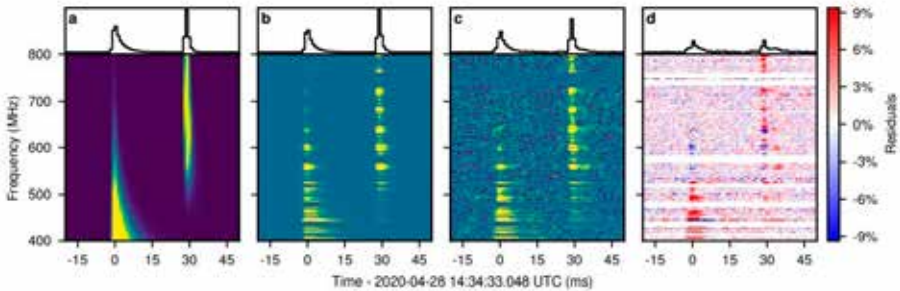
L'imageur IBIS d'INTEGRAL a permis de déterminer avec précision l'origine de l'explosion, en mettant en évidence son association avec le magnétar. La plupart des autres satellites impliqués dans l'étude collaborative

de cet événement n'ont pu mesurer sa position dans le ciel. INTEGRAL a donc été crucial pour identifier que l'émission provenait bien de SGR 1935+2154.

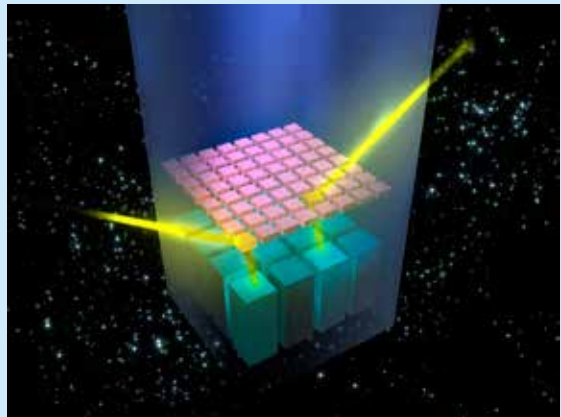
Ce lien soutient fortement l'idée que les Fast Radio Bursts émanent de magnétars et démontre que les rafales de ces objets hautement magnétisés peuvent également être repérées sur les longueurs d'onde radio. Les magnétars sont de plus en plus populaires auprès des astronomes car on pense qu'ils jouent un rôle clé dans le déclenchement de différents événements transitoires dans l'Univers, allant des explosions de supernovæ super-lumineuses aux sursauts gamma lointains et énergétiques.

Ce type d'approche collaborative et multi-longueurs d'onde et la découverte qui en résulte soulignent l'importance d'une coordination rapide et à grande échelle des efforts de recherche scientifique.

*Spectre dynamique de SGR 1935+2154 montrant le signal en fonction du temps et de la fréquence.*  
(Scholz et al., 2020)



*Illustration de la manière dont l'imagerie du satellite INTEGRAL de l'ESA (IBIS) peut reconstruire des images d'événements violents comme les salves de rayons gamma (GRB). IBIS utilise deux couches de détection, alors que la plupart des télescopes à rayons gamma n'en comportent qu'une. Dans IBIS, les rayons gamma de plus hautes énergies déclenchent la première couche de détection (appelée ISGRI), perdant ainsi un peu d'énergie, mais ils ne sont pas complètement absorbés. C'est ce qu'on appelle la diffusion Compton. Les rayons gamma déviés passent ensuite à travers la couche inférieure (appelée PICSIT) où ils peuvent être capturés et absorbés par les cristaux PICSIT parce qu'ils ont perdu un peu d'énergie lors de leur passage à travers la première couche. La partie de l'image en bleu décrit le champ de l'instrument. IBIS peut voir dans les coins car les rayons*



*gamma des GRB les plus puissants passent à travers le blindage en plomb sur le côté du télescope, puis à travers la première couche de détection avant de s'arrêter dans la deuxième couche. Les sites de diffusion dans les deux couches de détection et les quantités d'énergie déposées peuvent alors être utilisés pour déterminer la direction du GRB.*  
(ESA/C. Carreau)