



# Astronomie dans le Monde

## *Hygiea*

*Basé sur des communiqués ULiège et ESO*

Des observations effectuées au moyen de l'instrument SPHERE qui équipe le Very Large Telescope (VLT) de l'ESO invitent les astronomes à classer l'astéroïde Hygiea parmi les planètes naines. Ses dimensions le situent en quatrième position des objets les plus gros de la ceinture d'astéroïdes après Cérès, Vesta et Pallas. Grâce à des clichés d'une résolution exceptionnelle, les astronomes ont pu étudier sa surface, déterminer sa forme ainsi que sa taille. Il est ainsi apparu qu'Hygiea est sphérique, et détrône probablement Cérès de son rang de plus petite planète naine du Système solaire. E. Jehin et M. Ferrais, astronomes de l'ULiège ont participé à cette étude en utilisant notamment les télescopes TRAPPIST.

Pour être officiellement considérée comme une planète naine, un corps du Système solaire doit remplir, selon l'Union Astronomique Internationale, quatre conditions. Il doit être en orbite autour du Soleil; mais pas autour d'une planète (sinon il s'agirait d'une lune); il ne doit pas avoir « nettoyé » le voisinage de son orbite comme l'ont fait les planètes principales; et il doit avoir une masse suffisante pour atteindre l'équilibre hydrostatique, c'est-à-dire avoir une forme plus ou moins sphérique.

Le Système solaire contient de nombreux corps qui répondent aux trois premières exigences, parmi lesquels les milliers d'astéroïdes situés dans la ceinture d'astéroïdes entre Mars et Jupiter. Mais les nouvelles observations de l'un des plus gros astéroïdes de cette région montrent qu'il pourrait bien également respecter la dernière condition et entrer dans le cercle restreint des planètes naines.

Son nom est Hygiea et c'est le quatrième plus gros astéroïde, derrière la planète naine Cérès (945 km de diamètre) et les astéroïdes Vesta (525 km) et Pallas (512 km) dans la ceinture principale. Hygiea se trouve à une distance moyenne de 470 millions de km du Soleil, trois fois plus loin que la Terre.

Jusqu'à présent, Hygiea avait été peu étudié et mal compris – il était considéré comme un énorme corps rocheux grossièrement allongé d'environ 500 km sur 350 km ayant un cratère d'impact géant. De nouvelles observations faites avec le Very Large Telescope (VLT) de l'Observatoire Européen austral au Chili et les deux télescopes TRAPPIST de l'ULiège ont permis de révéler sa véritable forme et ses origines.

Grâce à l'optique adaptative de l'instrument SPHERE du VLT, Hygiea s'est révélée presque sphérique et devrait ainsi être classée comme planète naine.

Selon les nouvelles mesures, Hygiea a en effet un diamètre d'un peu plus de 430 km et une période de rotation qui a été revue fortement à la baisse, d'un facteur deux environ, à seulement 13,8 heures grâce à l'utilisation des deux télescopes TRAPPIST durant plus d'une centaine d'heures. Cette donnée est un paramètre important pour reconstruire le modèle 3D.

L'absence d'un grand cratère d'impact est aussi une surprise. En effet, Hygiea est le plus gros représentant d'une famille d'environ 7 000 astéroïdes qui partagent des orbites et des compositions très similaires. Un impact important aurait dû être à l'origine de ces milliers d'astéroïdes ; or seulement deux petits cratères ont été détectés à sa surface.

Pour résoudre cette énigme, l'équipe a effectué de nombreuses simulations. Le scénario qui permet d'expliquer le mieux la forme sphérique d'Hygiea et la famille d'astéroïdes associée fait intervenir une énorme collision qui s'est produite il y a environ 2 milliards d'années, avec un astéroïde de diamètre compris entre 75 et 150 km se déplaçant à grande vitesse et qui a complètement pulvérisé le corps parent. Des débris ont été éjectés au loin formant de plus petits astéroïdes, mais la masse principale de morceaux fondus et chauds s'est effondrée. En se refroidissant et

en se durcissant, ils ont reformé une sphère presque parfaite.

Si Hygiea est officiellement classée en tant que planète naine, elle élargira la gamme de tailles auxquelles ces objets peuvent être trouvés, ce qui signifie qu'il pourrait y avoir beaucoup plus de planètes naines que nous le pensions dans le Système solaire.

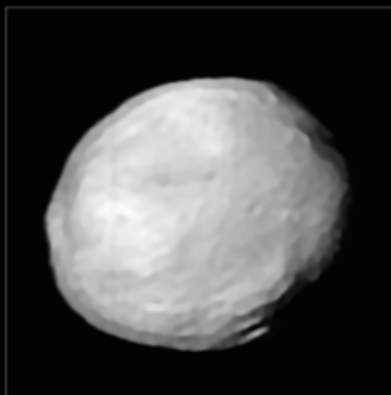
*Des observations effectuées au moyen de l'instrument SPHERE qui équipe le Very Large Telescope de l'ESO ont révélé que la surface d'Hygiea ne présentait aucune trace du grand cratère d'impact attendu par les scientifiques. Sa formation résultant de l'un des plus gros impacts survenus dans la ceinture d'astéroïdes, ils s'attendaient à trouver une marque visible, profonde et étendue, semblable à celle oblitérant la surface de Vesta (en bas à droite, panneau central).*

*Cette nouvelle étude révéla également la forme sphérique d'Hygiea, détrônant ainsi Cérés du rang de plus petite planète naine du Système solaire. L'équipe a utilisé les observations de SPHERE pour contraindre la taille d'Hygiea, et établir son diamètre à quelque 430 km, tandis que celui de Cérés avoisine les 950 km.*

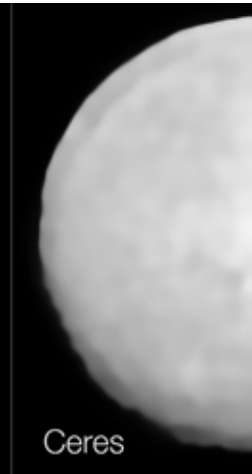
*(ESO/P. Vernazza et al., L. Jorda et al./ MISTRAL algorithm / ONERA/CNRS)*



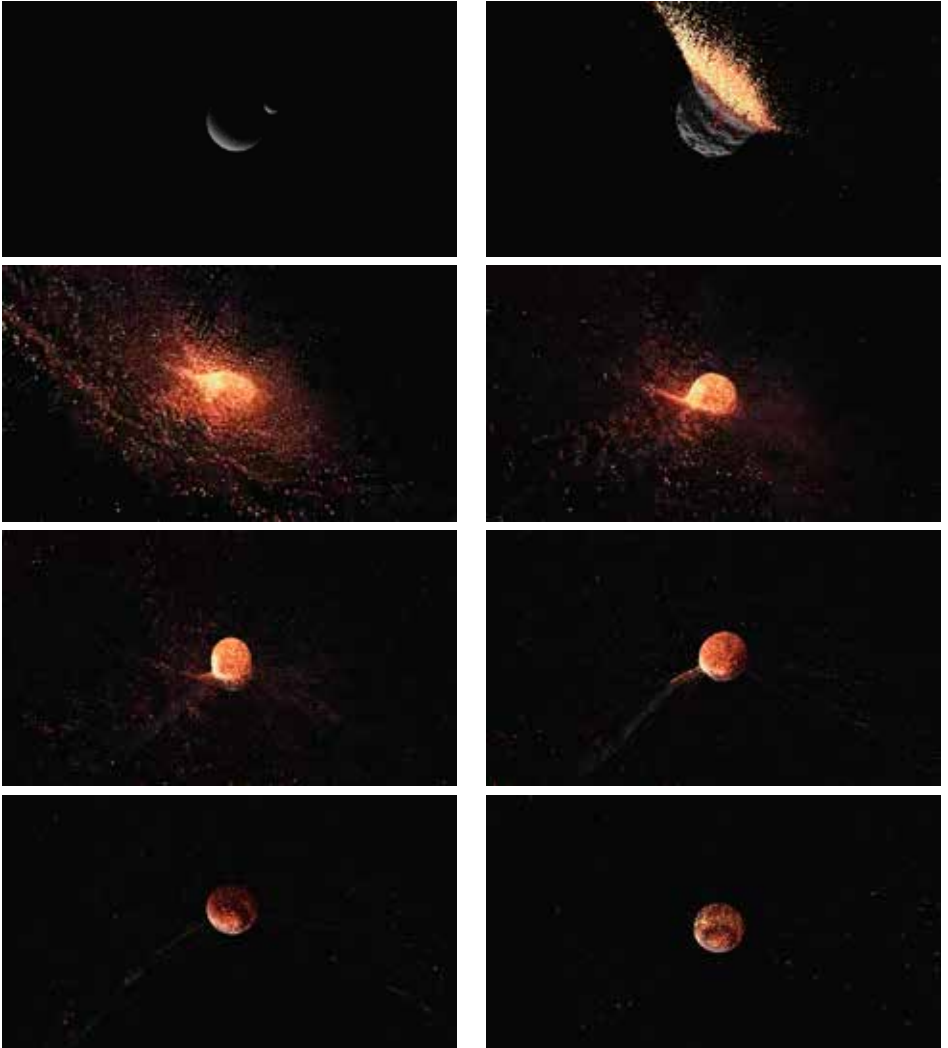
Hygiea



Vesta



Ceres



*Simulation de la fragmentation et du ré-assemblage ayant conduit à la formation d'Hygiea et de sa famille d'astéroïdes suite à un impact avec un objet de grandes dimensions. Les changements de forme d'Hygiea se produisirent après l'impact et conduisirent la candidate planète naine à acquérir sa forme sphérique actuelle.  
(P. Ševeček/Charles University)*



*Impression d'artiste de la planète K2-18b et de son étoile. Une seconde planète K2-18c, représentée dans le lointain, a été proposée mais non confirmée. (ESA/Hubble, M. Kornmesser)*

## ***De l'eau sur K2-18b***

Les observations réalisées avec le télescope spatial Hubble ont conduit à déceler de la vapeur d'eau dans l'atmosphère de la super-Terre K2-18b. Cette planète, huit fois plus massive que la Terre est dans la zone dite habitable de son système. Elle est ainsi la seule exoplanète connue où l'on trouve à la fois de l'eau et des températures permettant la vie.

On est encore loin d'avoir découvert une deuxième Terre. Cette planète est beaucoup plus lourde que la nôtre, avec une gravité beaucoup plus forte et sa composition atmosphérique est différente. L'étoile-hôte, K2-18 est une naine rouge, témoignant d'une forte activité et sujette à des sautes d'humeur. La planète est donc soumise à des niveaux de rayonnement pour le moins inconfortables. Tout cela fait un environnement plutôt hostile. C'est cependant un pas de plus dans la quête de mondes semblables au nôtre.

La signature de la vapeur d'eau a été cherchée dans des données d'archives acquises en 2016 et 2017 avec la caméra WFC3 (Wide Field Camera 3) de Hubble lors de 9 transits de K2-18b devant son étoile. Outre la molécule d'eau, les astronomes ont aussi trouvé de l'hydrogène et de l'hélium. Il pensent que d'autres

molécules, comme de l'azote et du méthane, pourraient être présentes, mais en quantité trop faibles pour être détectées avec les observations actuelles. Une estimation précise de la quantité d'eau dans l'atmosphère ainsi que de l'importance de la couverture nuageuse devra attendre de nouvelles observations.

K2-18b a été découverte en 2015 et est l'une des centaines de super-Terres – des planètes de masses intermédiaires entre celles de la Terre et de Neptune – trouvées par la mission Kepler. La nouvelle mission TESS de la NASA devrait elle aussi afficher à son palmarès des centaines de super-Terres dans les prochaines années. Rien d'étonnant à cela, puisque ce sont les planètes les plus abondantes et que les naines rouges sont les étoiles les plus communes.

Vu l'abondance de ces exoplanètes il est presque certain que beaucoup d'entre elles suivront K2-18b comme étant potentiellement habitables.

La prochaine génération de télescopes spatiaux, comme le James Webb Space Telescope ou ARIEL, sera en mesure de mieux caractériser les atmosphères. ARIEL, qui devrait être lancée en 2028, observera un millier de planètes en détail.

## ***Noyau de Mercure***

*Basé sur des  
communiqués NASA et CNRS*

On peut se faire une idée de l'intérieur d'une planète en analysant sa rotation et le mouvement d'une sonde en orbite. C'est ce qui a été fait pour Mercure avec la sonde Messenger.

On sait depuis longtemps que Mercure, tout comme la Terre, possède un noyau métallique. Avec 85 % de son volume constitué de métal, on a même pu comparer Mercure à un boulet de canon.

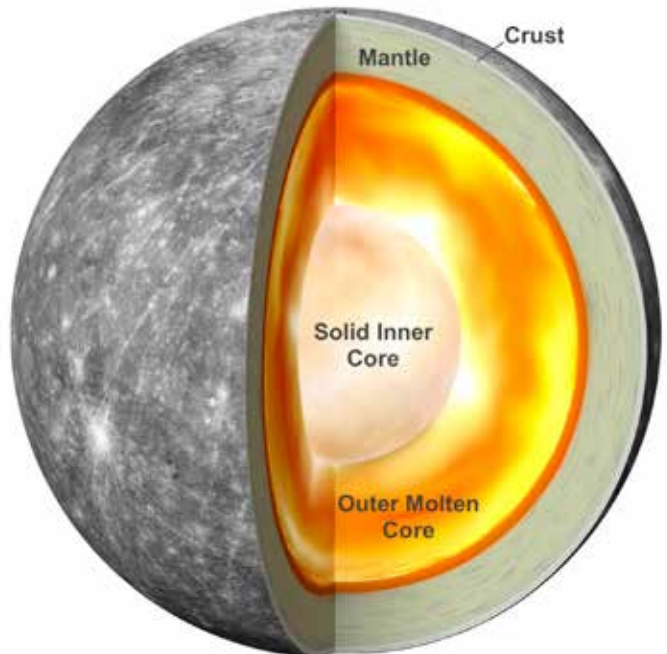
Ce noyau est liquide à l'extérieur et, dans le cas de notre planète, il est solide au centre. Une étude de la NASA a montré récemment que le cœur du noyau de Mercure est également solide et, chose surprenante, d'une taille comparable au cœur solide de la Terre.

Les différences entre les noyaux des planètes telluriques peuvent nous aider à comprendre comment s'est formé le Système solaire et comment les planètes rocheuses évoluent. L'intérieur de Mercure s'est refroidi plus vite que celui de la Terre mais son enveloppe liquide continue à entretenir un faible champ



Credits: ESA/ATG medialab, NASA/JPL

***Mission spatiale BepiColombo.  
(ESA/ATG medialab, NASA/JPL)***



***Schéma de la structure  
interne de la planète Mercure.  
(NASA's Goddard Space  
Flight Center)***

magnétique. Cela pourrait nous indiquer comment le champ magnétique terrestre changera avec le temps.

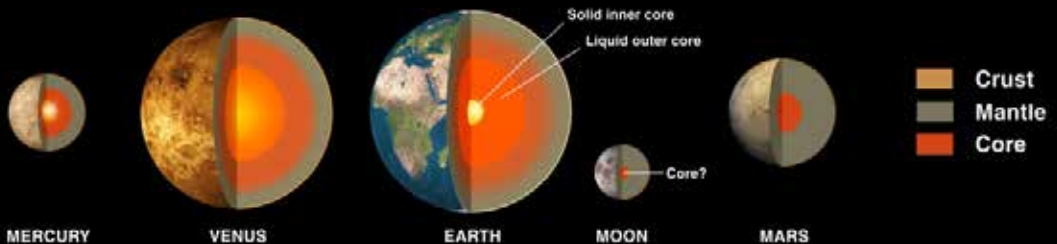
La sonde MESSENGER a tourné autour de Mercure de 2011 à 2015. Les observations radio ont permis de déterminer des anomalies gravitationnelles – des zones montrant un excès ou un défaut de masse –, et de situer avec précision la position des pôles de rotation. Les petites variations de la rotation, déjà notées depuis la Terre grâce à des observations radar en 2007, avaient révélé la présence de métal liquide dans le noyau de Mercure. Il a fallu une étude soignée de la rotation et du champ de gravité grâce à MESSENGER pour obtenir les informations permettant une modélisation précise de la structure interne.

Les scientifiques ont estimé le diamètre du noyau solide à 2 000 kilomètres, soit la moitié du noyau total. Par comparaison, le noyau solide de la Terre fait 2 400 kilomètres, un peu plus du tiers du noyau entier.

L'étude des données de la sonde américaine Messenger relatives au champ magnétique de la planète a conduit à affiner ces résultats. En effet, lorsque le champ magnétique externe, autour de Mercure, varie sous l'influence du vent solaire, son noyau génère ce que l'on appelle une réponse induite, proportionnelle au champ externe, mais aussi à sa taille, qu'il est donc possible de déduire. Avec 2 060 km, le noyau de Mercure est plus gros de 50 km que ce que l'on croyait. Le rayon du noyau atteint ainsi 85% du rayon de la planète !

Ces résultats lèvent ainsi un peu le voile autour de la mystérieuse Mercure, en attendant l'arrivée de la mission BepiColombo aux alentours de la planète en 2025.

*Schéma des structures internes des planètes telluriques, y compris la Lune.  
(adapté de la NASA)*



### **Triplet de trous noirs (I)**

Les grandes galaxies comme la nôtre ou celle d'Andromède contiennent des centaines de milliards d'étoiles et abritent en leur centre un trou noir de plusieurs millions de masses solaires. NGC 6240 est l'une de ces galaxies, mais elle se distingue par son aspect très irrégulier que l'on attribue à une collision. Elle serait le résultat de la coalescence de deux galaxies plus petites et il faudra un certain temps avant qu'elle ne retrouve une allure plus normale. En attendant les noyaux des galaxies initiales sont encore distincts et se rapprochent l'un de l'autre.

Une nouvelle étude a été réalisée à haute résolution au moyen du télescope VLT de l'ESO et de l'instrument MUSE en profitant de l'optique adaptative et d'étoiles guidées simulées par quatre lasers. Cette instrumentation sophistiquée a permis d'obtenir des images aussi fines que celles du télescope spatial Hubble, mais avec en prime un spectre de chaque pixel.

Les observations ont révélé la présence d'un troisième larron, un trou noir supermassif qui prouve que la collision avait mis en cause simultanément trois galaxies et non deux. Les trous noirs sont rassemblés dans un espace de moins de 3 000 années-lumière, soit un pour cent de la taille de la galaxie. Les spectres individuels de chaque objet étant obtenus avec MUSE, les mouvements des trous noirs ont pu être estimés ainsi que leur masse. Chacun d'eux pèse plus de 90 millions de fois autant que le Soleil.

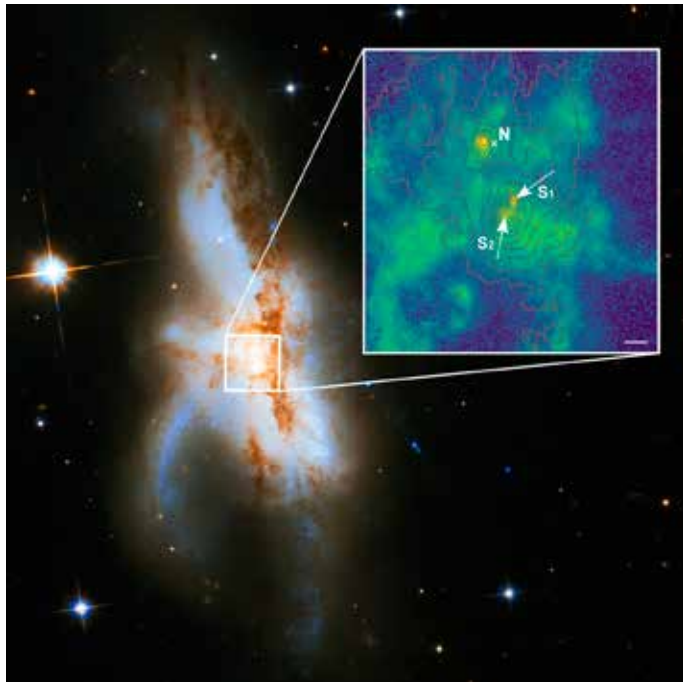
On pensait les collisions triples très improbables. NGC 6240 montre qu'elles sont plus fréquentes qu'on ne l'imaginait, ce qui explique la croissance beaucoup plus rapide de grosses galaxies.

La fusion des trois trous noirs aura lieu inexorablement dans des millions d'années et générera de puissantes ondes gravitationnelles. En attendant, le signal gravitationnel de ce système et celui d'autres trous noirs binaires et multiples devraient pouvoir être mesurés avec les futurs détecteurs comme LISA embarqués sur des satellites.

*La galaxie irrégulière NGC 6240. Les dernières observations lui ajoutent un troisième trou noir supermassif. On connaissait déjà celui noté N (nord) sur l'image. Les données à haute résolution ont permis de dédoubler en deux composantes (S1 et S2) ce que l'on croyait n'être qu'un seul trou noir.*

*Les nébulosités vertes sont du gaz ionisé par le rayonnement ambiant autour des trous noirs. Les courbes rouges montrent les niveaux de la luminosité due aux étoiles.*

*Le trait blanc long de 1 000 années-lumière indique l'échelle. (P. Weilbacher/AIP, NASA, ESA, the Hubble Heritage/STScI/AURA-ESA/Hubble Collaboration, A. Evans/University of Virginia, Charlottesville/NRAO/Stony Brook University)*



### ***Triplet de trous noirs (II)***

En recherchant des paires de trous noirs supermassifs les astronomes sont tombés par hasard sur un autre trio, les trous centraux de trois galaxies engagées dans une lente collision titanesque. Ce système porte le nom de SDSS J084905.51+111447.2 (SDSS J0849+1114 en bref) et est situé à un milliard d'années-lumière.

Pour arriver à cette découverte les astronomes ont dû combiner les données de télescopes au sol et en orbite. Les galaxies

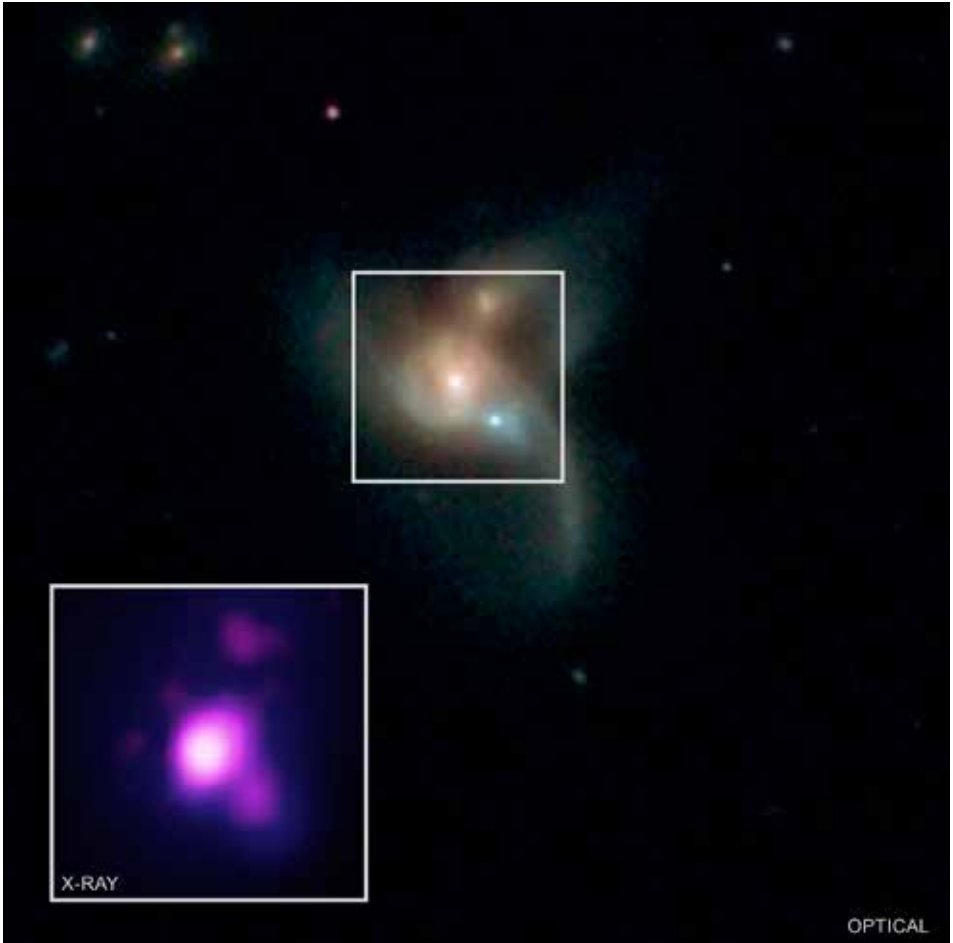
en collision avaient d'abord été identifiées par le projet citoyen Galactic Zoo basé sur le survey SDSS (Sloan Digital Sky Survey). Le télescope X Chandra montrait les trous noirs comme une source X au cœur de chacune des galaxies. Les mesures infrarouges du télescope spatial WISE et les observations X de Chandra et NuSTAR (Nuclear Spectroscopic Telescope Array) suggéraient qu'un des trous noirs était

#### ***Images X et optique de SDSS***

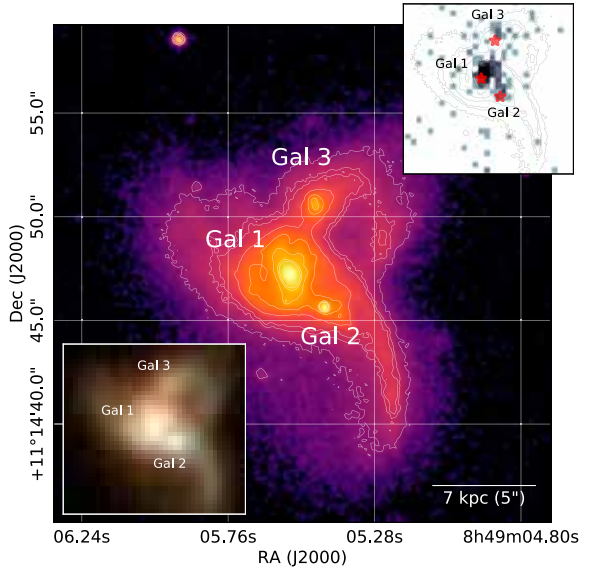
***J0849+1114.***

***(NASA/CXC/George Mason Univ./R.***

***Pfeifle et al. ; SDSS & NASA/STScI)***



*Image Hubble des trois galaxies en fausses couleurs montrant les niveaux d'intensité. La vignette du bas est une image SDSS, celle du haut une image Chandra dans le domaine X 0.3–8 keV. (Les trois noyaux sont indiqués par des étoiles.)*  
(Pfeifle et al., 2019)



entouré de grandes quantités de gaz et de poussière, signe avant-coureur d'une fusion. Les données optiques du SDSS et du télescope LBT (Large Binocular Telescope) montraient le spectre caractéristique de la matière happée par des trous noirs supermassifs.

C'est la combinaison de tous ces télescopes qui a permis l'identification du triplet. Les spectres optiques révèlent la présence de trous noirs tandis que les télescopes infrarouges et X permettent de percer les nuages de poussières, les astronomes espèrent bien trouver d'autres groupes en utilisant cette même technique.

Les paires et les triplets de trous noirs sont très rares. Ils révèlent les fusions de galaxies, c'est-à-dire le processus de leur croissance. Un triplet de trous noirs ne se comporte pas comme une paire. Contrairement au cas exceptionnel d'une rencontre triple (sujet précédent) deux des trois trous noirs fusionnent en premier, et cela, beaucoup plus rapidement

que s'il n'y avait pas le troisième larron. C'est peut-être ceci qui résout le problème du « parsec final » : deux trous noirs s'approchent assez facilement à quelques années-lumière l'un de l'autre, mais ensuite leur énergie orbitale est trop grande pour permettre la coalescence. L'influence d'un troisième objet pourrait alors venir à la rescousse comme dans SDSS J0849+1114.

Des simulations numériques montrent que 16% des paires de trous noirs dans des galaxies en collision auront interagi avec un troisième trou noir avant de fusionner. Ces fusions produisent des ondes gravitationnelles de plus basse fréquence que celles détectées par LIGO et Virgo. Ces ondes pourraient être observées au travers d'observations radio de pulsars et par les futurs observatoires spatiaux comme LISA (Laser Interferometer Space Antenna) qui pourront atteindre des trous noirs de masse allant jusqu'à un million de fois celle du Soleil.

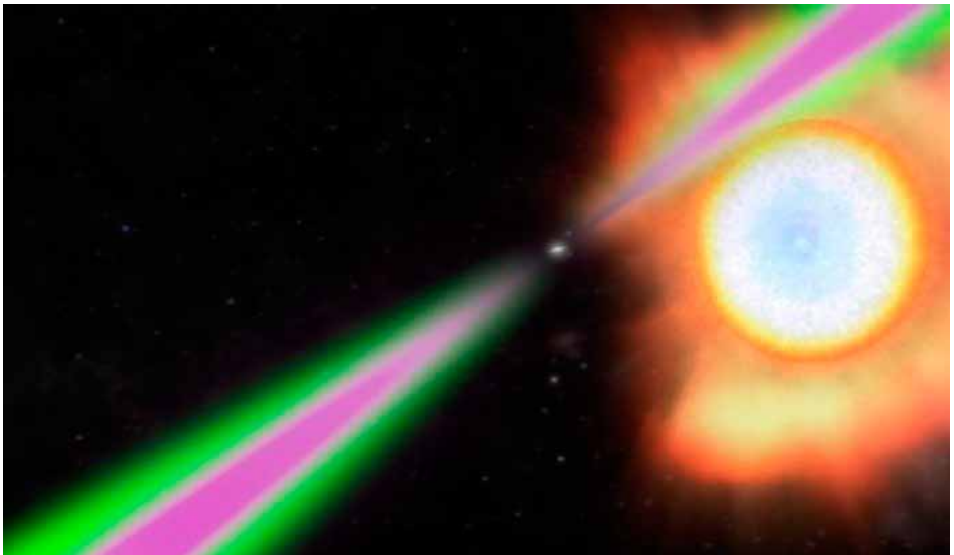
## **Le pulsar PSR J0952-0607**

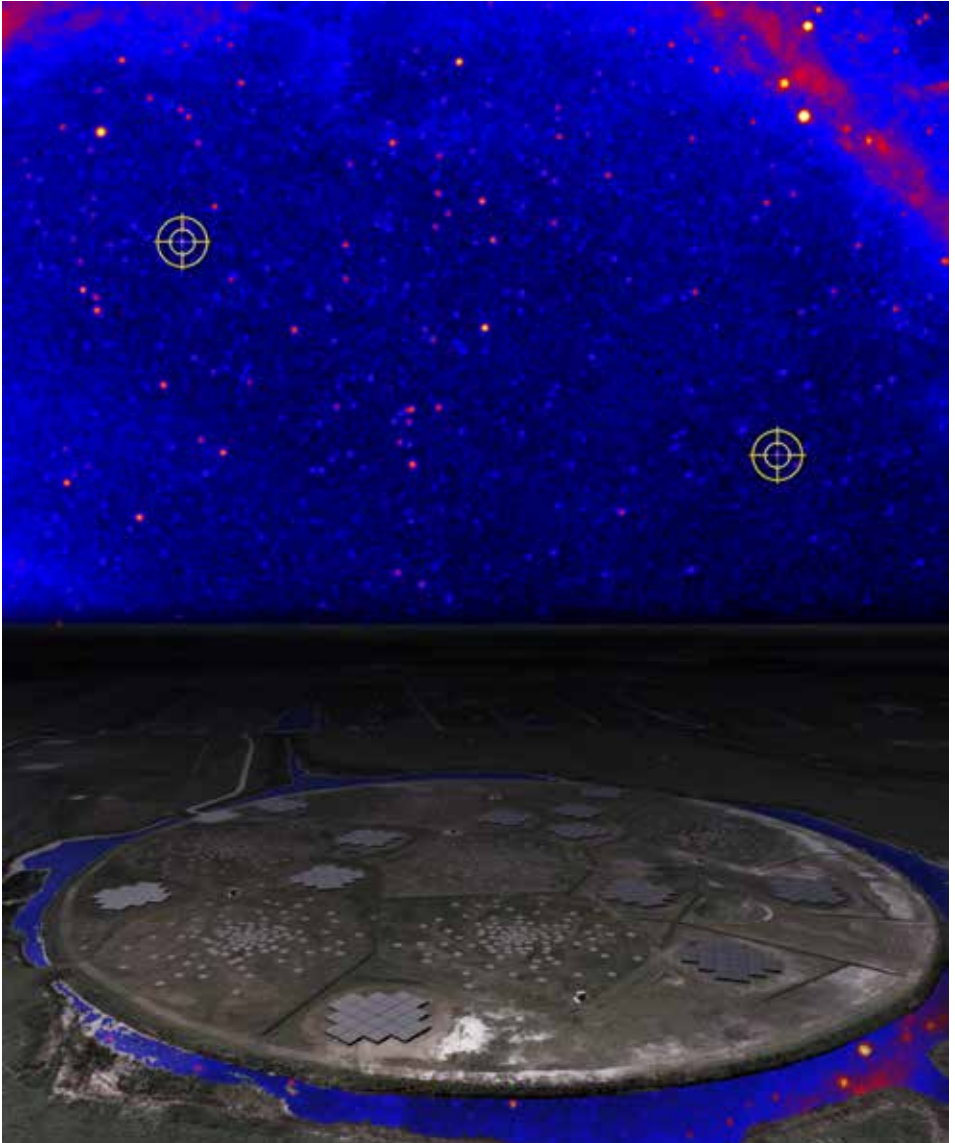
Le pulsar PSR J0952-0607 a été découvert en 2017 lors d'observations radio d'un candidat identifié par l'observatoire spatial gamma Fermi. Le télescope LAT (Large Area Telescope) à bord de Fermi n'avait pas détecté de pulsations gamma, mais le réseau LOFAR de radiotélescopes avait pu montrer qu'il s'agissait d'un pulsar battant 707 fois par seconde. L'objet fait partie d'un système binaire. Le compagnon est 50 fois moins massif que le Soleil et la période orbitale est de 6,2 heures. Ce pulsar est le plus rapide de ceux de notre galaxie qui ne se trouvent pas dans un amas globulaire. Il n'est surpassé, et de peu, que par le pulsar SR J1748-2446ad de l'amas globulaire Terzan 5 qui tourne à la fréquence de 716 Hz.

Les pulsars sont des étoiles à neutrons, restes compacts d'explosions stellaires. Leur contraction les a animés de vitesses de rotation élevées et de champs magnétiques puissants. Ils émettent des faisceaux de rayonnement qui, en tournant, balayent l'espace comme des phares de marine. Si la Terre se trouve dans le pinceau d'un de ces phares, on observe un pulse à chaque rotation.

Les astronomes ont voulu savoir si PSR J0952-0607 montrait aussi des pulsations dans le domaine gamma, une entreprise délicate car en 8 ans et demi d'observation, le télescope gamma de Fermi n'a enregistré en tout et pour tout qu'environ 200 photons, soit une moyenne d'un photon pour un milliard de rotations du pulsar. L'enjeu était donc de savoir à quelle phase de la rotation de 0,0014 seconde chaque photon gamma avait été émis. Cette recherche soigneuse des rayons gamma a nécessité deux jours de calculs sur un superordinateur. Une tâche qui aurait demandé des dizaines

*Vision d'artiste d'un pulsar veuve noire et de son compagnon stellaire, dans le plan de l'orbite. Le rayonnement puissant et le vent de particules énergétiques provenant du pulsar échauffent fortement un hémisphère de l'étoile, jusqu'à deux fois la température de la photosphère solaire. Le pulsar est ainsi en train d'évaporer graduellement son compagnon, ce qui emplit le système de gaz ionisé et masque la plupart du temps le faisceau radio du pulsar.  
(NASA's Goddard Space Flight Center/Cruz deWilde)*





*LOFAR (Low-Frequency Array) est un réseau de milliers d'antennes situées majoritairement aux Pays-Bas. Ce dessin illustre la découverte de deux pulsars milliseconde. Celui de droite est J0952-0607 de fréquence 707 Hz. Celui de gauche, J1552+5437, pulse 412 fois par seconde. La moitié supérieure de l'image montre le ciel gamma vu par Fermi. En bas le groupe principal d'antennes près d'Exloo. (NASA/DOE/Fermi LAT Collaboration, ASTRON)*

d'années sur un ordinateur domestique. Les résultats ont permis de corriger une erreur sur la position qui avait été déduite d'observations optiques. Une fois corrigé, le signal final montrait effectivement une pulsation à la bonne fréquence.

Curieusement, la pulsation n'est pas présente dans les données antérieures à juillet 2011. La raison de ce comportement est encore mystérieuse. L'orbite du pulsar ne semble pas avoir changé et les données sont insuffisantes pour conclure que le flux gamma a varié au cours du temps.

Des observations optiques ont été réalisées avec le télescope NTT (New Technology Telescope) de 3 m 50 de l'ESO à La Silla et du Gran Telescopio Canarias de La Palma. L'idée était d'observer le compagnon du pulsar. Il est probablement synchronisé dans sa rotation comme la Lune autour de la Terre, avec une même face toujours dirigée vers le pulsar. On voit ainsi alternativement défiler à toute vitesse ses faces chaude et froide et l'on observe des variations de couleur et d'éclat.

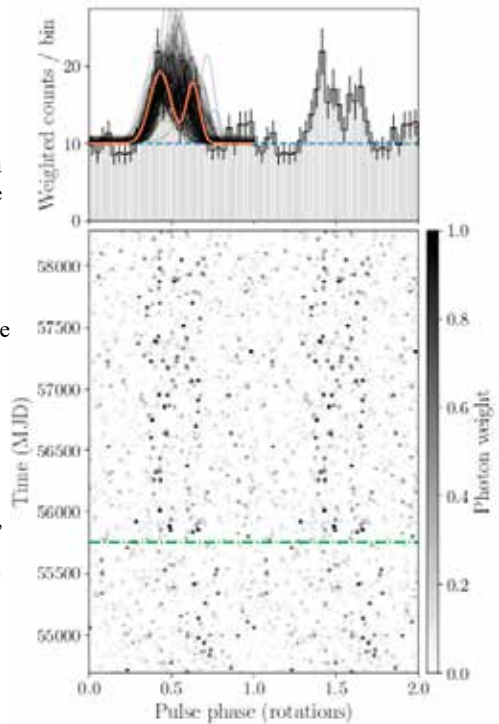
Une surprise attendait cependant les astronomes, car ces observations impliquent une distance trois fois plus grande que les 4400 années-lumière déterminées par les observations radio – s'il était aussi près que cela, le compagnon devrait être très anormalement compact. Une explication pourrait venir d'une onde de choc dans le vent de particules émis par le pulsar qui n'échaufferait pas le compagnon comme on le pensait.

D'autres scientifiques ont cherché dans les données LIGO les ondes gravitationnelles émises par le pulsar. Rien n'a été trouvé. Ce résultat implique que l'étoile à neutrons est parfaitement sphérique, avec des irrégularités ne dépassant pas une fraction de millimètre.

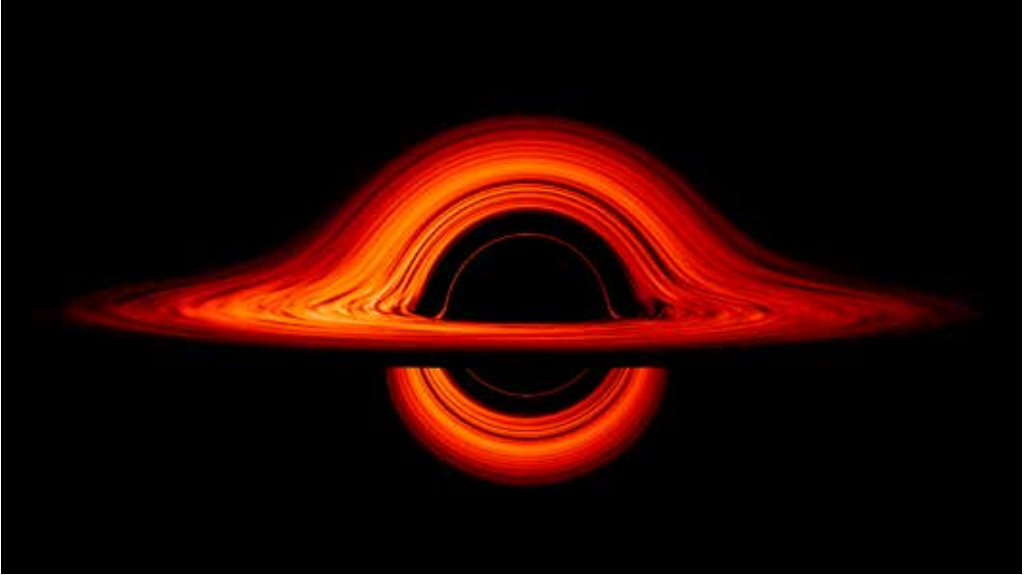
L'étude de pulsars aussi rapides est importante car elle touche aux limites extrêmes de la physique. On ne sait pas jusqu'à quelle vitesse les étoiles à neutrons peuvent tourner avant que la force centrifuge ne les disloque. Cette rotation ultra-rapide est due à l'accrétion de la matière du compagnon, un processus qui s'accompagne aussi de l'enfouissement du champ magnétique. Effectivement, le champ

de J0952-0607 est l'un des dix plus faibles mesurés pour un pulsar, en accord avec la théorie.

Cette découverte montre que des pulsars extrêmes restent sans doute cachés parmi les données de Fermi LAT. Peut-être que le projet citoyen Einstein@Home en débusquera certains.



**Profil du pulse gamma durant deux rotations du pulsar J0952-0607. En bas, on voit la distribution des photons au cours des dix années d'observation. L'échelle de gris donne la probabilité de chaque photon de provenir du pulsar. La date julienne « modifiée » (MJD) est portée en ordonnées. À partir de la mi-2011 (ligne tirée verte), les photons s'alignent sur le profil, ce qui valide la détection après cette date. (L. Nieder/Max Planck Institute for Gravitational Physics)**



### *Visions d'un trou noir*

Une nouvelle visualisation de trou noir montre comment la gravité distord l'objet et son environnement comme dans un miroir déformant. Il s'agit d'une simulation d'un trou noir autour duquel la matière s'est accrétée en un disque. (<https://svs.gsfc.nasa.gov/13326>)

Des zones brillantes apparaissent et disparaissent dans le disque au gré de l'agitation du gaz et du champ magnétique. Près du trou noir le gaz tourne à une vitesse proche de celle de la lumière. Cette vitesse diminue lorsqu'on s'en éloigne, ce qui provoque des déchirures et des zones plus sombres.

Vu de côté, le disque est plus brillant à gauche, car le gaz vient vers nous et un effet relativiste amplifie la luminosité. Cette asymétrie disparaît lorsque l'on voit le disque de face.

Près du trou noir la gravité dévie si fortement les rayons lumineux que l'on voit le dessous du disque comme un anneau entourant le trou noir. C'est « l'anneau de photons » constitué en fait de multiples anneaux progres-

*Vu presque de profil, le disque d'un trou noir prend une apparence très curieuse.*

*(NASA's Goddard Space Flight Center/Jeremy Schnittman)*

sivement de plus en plus faibles et fins, et qui viennent de la lumière qui a tourné une, deux, ou plusieurs fois autour du trou noir.

À l'intérieur de l'anneau de photons on trouve l'ombre du trou noir, une région deux fois plus grande que l'horizon des événements, le point de non-retour.

Ce genre de visualisation permet d'appréhender ce qu'Einstein voulait exprimer en disant que la gravité déforme la trame de l'espace et du temps.

Jusqu'à récemment, on n'avait que des simulations, mais le télescope Event Horizon a changé cela en nous donnant la première image radio d'un trou noir, celui situé au centre de la galaxie M87.

## ***Les pouponnières d'étoiles des galaxies lointaines***

*Basé sur des communiqués Unige et CNRS/INSU*

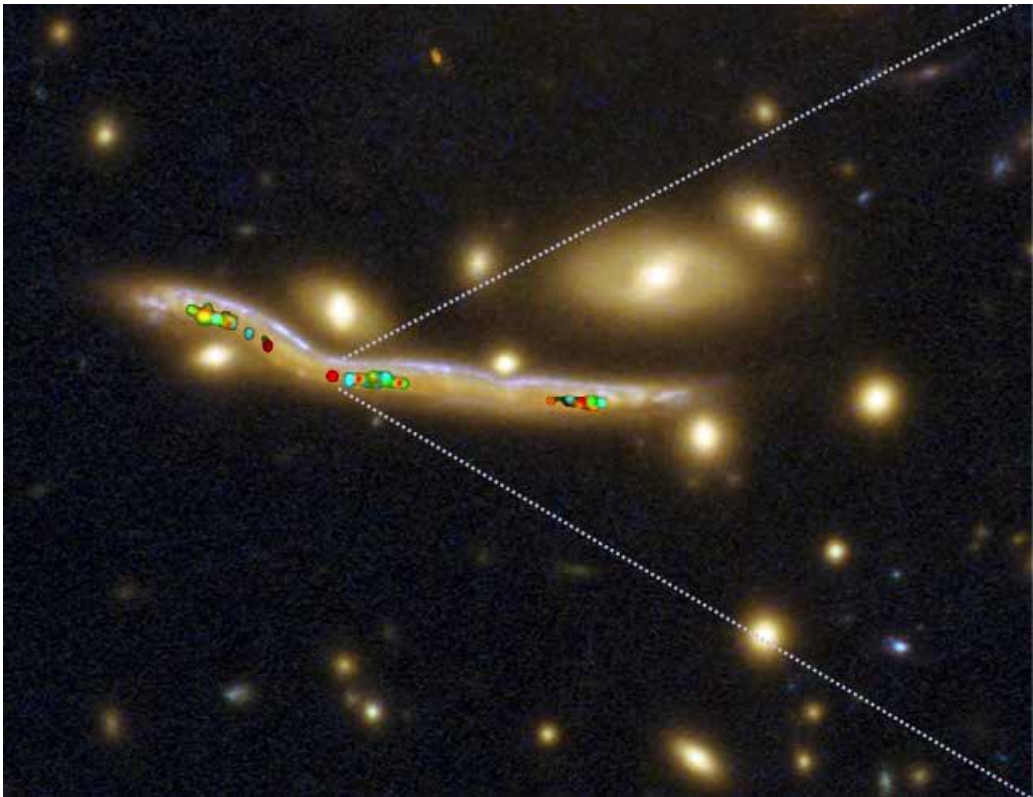
Les amas d'étoiles sont formés par la condensation de nuages moléculaires, des ensembles de gaz froid et dense présents dans toutes les galaxies.

Dans les galaxies proches, comme la Voie lactée, un nuage moléculaire produit entre 1 000 et 1 000 000 d'étoiles. Pourtant, dans les galaxies lointaines, situées à plus de 8 milliards d'années-lumière, les astronomes observent des amas gigantesques contenant jusqu'à 100 fois plus d'étoiles. Pourquoi une telle différence ?

Pour répondre à cette question, les astronomes ont pu bénéficier d'un télescope naturel

– le phénomène de lentille gravitationnelle –, couplé à l'usage d'ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array), un interféromètre de 50 antennes radio millimétriques qui reconstruisent l'image entière d'une galaxie de manière instantanée. Les lentilles gravitationnelles sont des télescopes naturels qui profitent de l'alignement d'un objet massif entre l'observateur et l'objet lointain. Grâce à cet effet, on obtient des zooms sur des parties

***Nuages moléculaires détectés à une résolution jamais égalée jusqu'à aujourd'hui de 90 années-lumière dans le Serpent Cosmique, situé à plus de 8 milliards d'années-lumière. (UNIGE, Dessauges)***



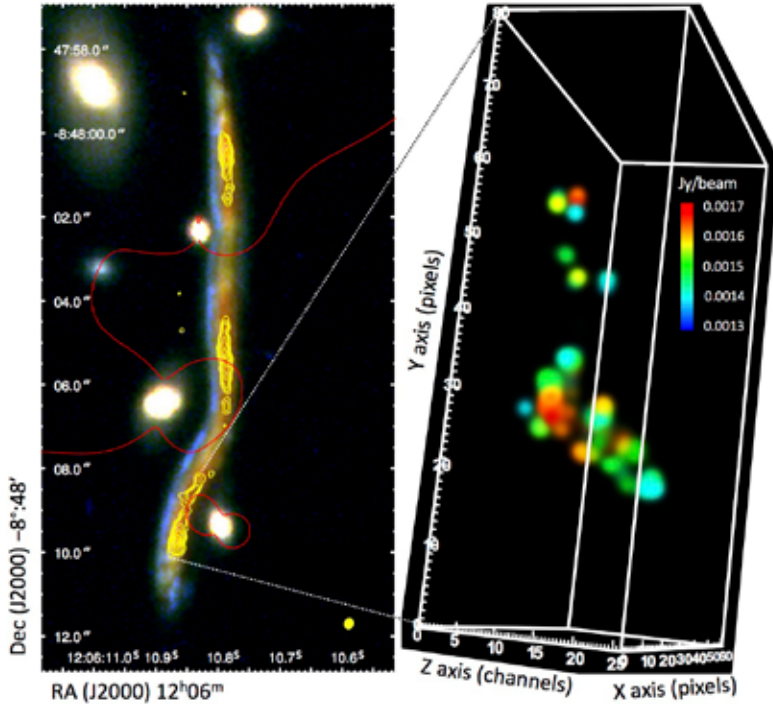
des galaxies lointaines que l'on peut alors étudier avec une résolution inégalée de 90 années-lumière. ALMA, quant à lui, permet de mesurer le niveau de monoxyde de carbone qui sert de traceur de l'hydrogène moléculaire.

Cette résolution a permis de caractériser les nuages de manière individuelle dans une galaxie lointaine, surnommée le Serpent Cosmique, située à 8 milliards d'années-lumière. C'est la première fois que l'on peut y différencier les nuages moléculaires les uns des autres. Les astronomes ont ainsi comparé la masse, la taille, la densité et les turbulences internes entre les nuages moléculaires des galaxies proches et lointaines. On pensait que les nuages avaient les mêmes propriétés, quels que soient le temps et les galaxies, mais les observations ont démontré le contraire !

En effet, ces premières observations ont révélé que les nuages moléculaires des galaxies lointaines avaient une masse, une densité et des turbulences de 10 à 100 fois plus élevées que les nuages des galaxies proches. De telles valeurs avaient uniquement été mesurées dans des nuages de galaxies proches entrées en collision, rendant leur milieu interstellaire semblable à celui des galaxies lointaines. Les chercheurs ont ainsi mis en relation ces différences de propriétés physiques des

***Observé à des résolutions 50 000 fois meilleures, chacun de ces nuages ressemble au gaz tourmenté de la nébuleuse Carina située à seulement 7 500 années-lumière, véritable pouponnière d'étoiles naissantes.***  
***(NASA, ESA)***





*Image obtenue avec le télescope spatial Hubble du Serpent Cosmique (à gauche). Les contours en jaune montrent l'émission du monoxyde de carbone, observée avec l'interféromètre ALMA. À droite, il s'agit d'un zoom sur la partie sud du Serpent Cosmique montrant en trois dimensions les nuages moléculaires détectés à la résolution de 90 années-lumière dans une galaxie lointaine, typique d'une Voie lactée en devenir. (Dessauges, Miroslava)*

nuages avec les environnements des galaxies, plus extrêmes et hostiles dans les galaxies lointaines que ceux de leurs sœurs proches : un nuage moléculaire de galaxie proche s'effondrerait instantanément et serait détruit dans le milieu interstellaire des galaxies lointaines, d'où ses propriétés multipliées pour garantir sa survie et son équilibre. Hasard ou pas, la masse caractéristique des nuages moléculaires du Serpent Cosmique apparaît en parfait accord avec le scénario de fragmentation de disques galactiques turbulents, proposé comme mécanisme de formation de nuages moléculaires massifs dans les galaxies lointaines.

L'équipe internationale a aussi découvert que le niveau d'efficacité de formation

d'étoiles des nuages moléculaires du Serpent Cosmique est particulièrement élevé, favorisé par les grandes turbulences internes des nuages. Dans les galaxies proches, un nuage forme en étoiles environ 5% de sa masse. Dans les galaxies lointaines, ce chiffre grimpe à 30%.

Les astronomes vont à présent étudier d'autres galaxies lointaines, afin de confirmer leurs observations faites sur le Serpent Cosmique. Ils pensent également pousser plus loin la résolution en profitant des performances uniques de l'interféromètre ALMA et analyser plus en détail cette capacité des nuages moléculaires observés dans les galaxies lointaines à former des étoiles si efficacement.

## Un halo bien calme

*Basé sur un communiqué UCSC*

Utiliser un objet mystérieux pour en analyser un autre, voilà l'exploit qu'ont réussi les astronomes. En l'occurrence, il s'agit de sonder le halo d'une lointaine galaxie massive à la lueur d'un sursaut radio qui s'est produit en arrière-plan.

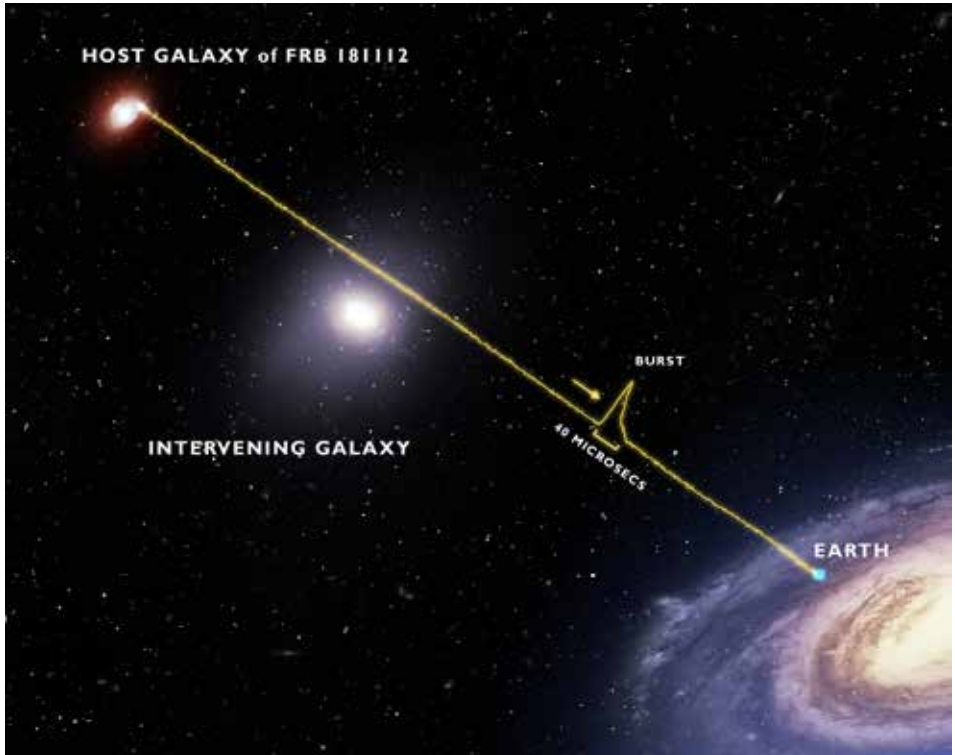
Ce sursaut FRB (Fast Radio Burst) 181112, très bref (durant moins d'un millième de seconde), a été observé avec le réseau ASKAP (Australian Square Kilometre Array

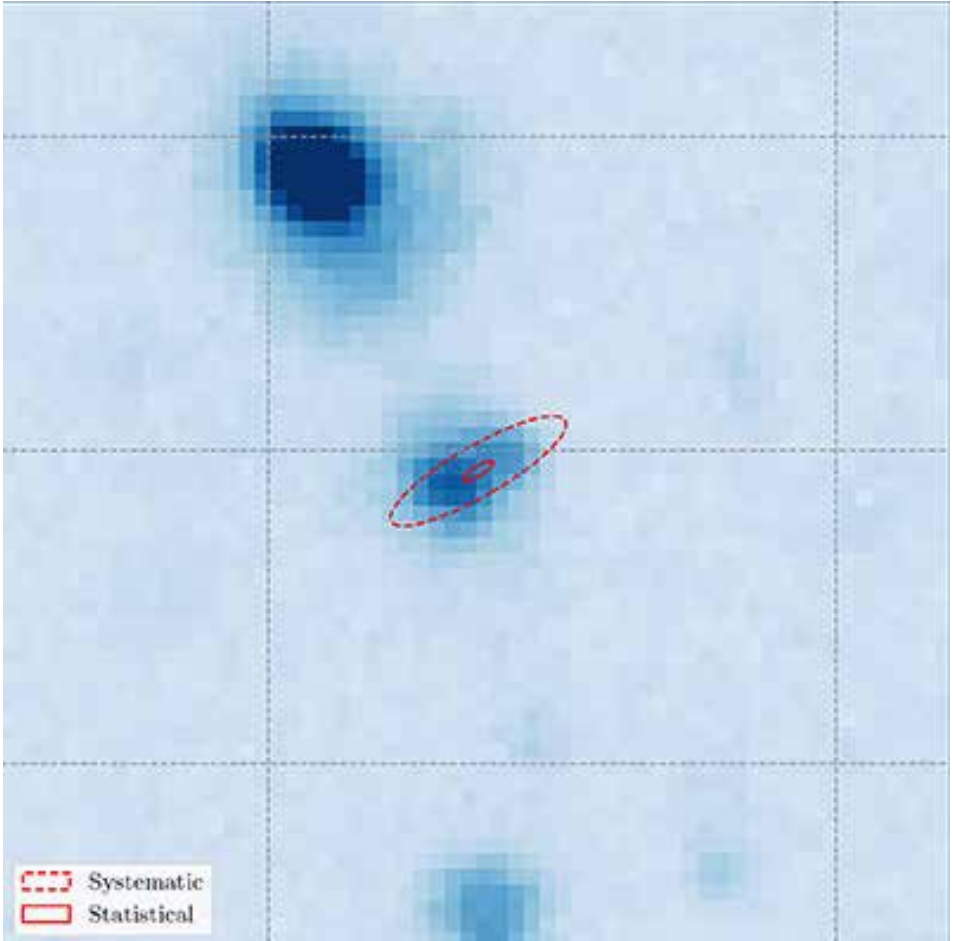
***Le signal radio du sursaut FRB 181112 traverse le halo d'une galaxie avant de parvenir aux télescopes.***  
*(J. Josephides, Centre for Astrophysics and Supercomputing, Swinburne University of Technology)*

Pathfinder) de radiotélescopes du CSIRO, l'instrument même qui avait permis pour la première fois de localiser certains de ces sursauts dans des galaxies. L'observation avec d'autres télescopes a permis d'identifier non seulement la galaxie-hôte, mais aussi une autre galaxie d'avant-plan sur la ligne de visée.

Les astronomes ont ainsi pu profiter d'une source de lumière dans laquelle se profilait le spectre d'absorption des gaz du halo de la galaxie proche.

Les halos comprennent une part importante de la masse des galaxies. Immenses, de faible densité, et très chauds, ils sont à peu près invisibles alors que leur masse est comparable à celle cumulée des étoiles. Une galaxie massive de 30 000 années-lumière peut avoir un halo sphérique dix fois plus grand, contenant à la fois de la matière normale (baryonique) faite essentiellement de gaz io-





nisé mais aussi de la matière sombre de nature encore inconnue. En tombant vers le centre de la galaxie, le gaz du halo entretient la formation de nouvelles étoiles, tandis que d'autres processus comme les explosions de supernovæ et les vents stellaires renvoient de la matière vers le halo. Une raison d'étudier le halo est de comprendre les détails de cette éjection qui est susceptible de freiner la formation d'étoiles et, en particulier, de comprendre la structure des champs magnétiques au travers des galaxies.

*Cette image prise avec le Very Large Telescope (VLT) de l'ESO montre au centre la galaxie-hôte avec la position du FRB représentée par des ellipses rouges. Le halo de la galaxie brillante s'étend jusque là et a été traversé par le signal du FRB. (Prochaska et al., Science 2019)*

Les mesures faites sur le halo situé devant FRB 181112 indiquent un milieu de très basse densité et un champ magnétique très faible. En fait le signal radio du sursaut a été à peine perturbé par la présence de la galaxie, contrairement à ce que prédisent les théories.

Le sursaut se composait de plusieurs impulsions brèves (moins de 40 microsecondes). Une telle rapidité donne une limite supérieure à la densité du halo, moins d'un

atome pour dix centimètres cube. Une densité plus forte aurait conduit à une dégradation du signal. Cela exclut aussi la possibilité que le halo renferme des poches ou des nuages de gaz plus dense et plus froid (10 000 K).

La variation de la polarisation des ondes radio en fonction de la fréquence s'avère également très faible, ce qui indique un champ magnétique très peu intense.

Il s'agit maintenant de voir si ces propriétés sont exceptionnelles ou communes à tous les halos. ASKAP et d'autres radiotélescopes seront mis à profit pour étudier d'autres halos situés devant des FRB, et avoir ainsi des données concernant tout un éventail de galaxies de masses et d'âges divers.

***Le réseau ASKAP de radio  
télescopes dans l'outback d'Australie  
Occidentale a détecté et localisé le  
FRB.  
(CSIRO/Alex Cherney)***





## **GW170817**

*Basé sur un communiqué ESO*

L'événement GW170817 correspondant à la coalescence de deux étoiles à neutrons avait donné lieu à la cinquième détection d'ondes gravitationnelles au moyen de l'instrument LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) de la NSF aux États-Unis et de l'interféromètre Virgo en Italie. Située dans la galaxie NGC 4993, la fusion fut la première, et à ce jour la seule source d'ondes gravitationnelles dont la contrepartie visible fit l'objet d'un suivi et d'une détection par des télescopes au sol.

C'est ainsi que l'ESO a pointé ses télescopes chiliens, au premier rang desquels le VLT, en direction de GW170817. D'après les astronomes, si les collisions d'étoiles à neutrons s'accompagnaient de la formation d'éléments plus lourds, les signatures de ces éléments pourraient être détectées dans les kilonovæ, vestiges explosifs de ces fusions. C'est précisément ce que vient de réaliser une équipe de chercheurs européens, au moyen de

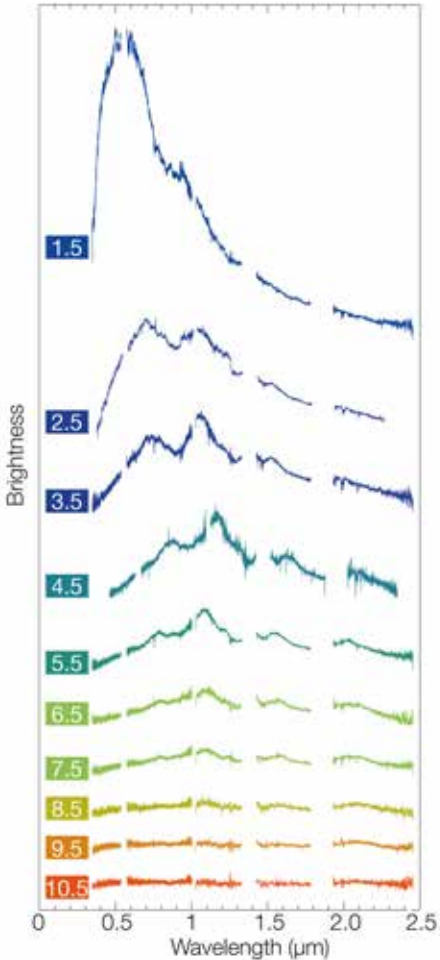
*Vue d'artiste de deux étoiles à neutrons de faibles dimensions mais de densités élevées sur le point de fusionner et d'exploser en kilonova. À l'avant-plan figure une représentation du strontium nouvellement créé.*

*(ESO/L. Calçada/M. Kornmesser)*

données acquises par l'instrument X-shooter installé sur le VLT de l'ESO.

Le suivi de l'explosion de la kilonova s'est effectué sur une gamme étendue de longueurs d'onde. L'instrument X-shooter a notamment acquis une série de spectres s'étendant de l'ultraviolet à l'infrarouge. Une première analyse de ces spectres suggérait bien la présence d'éléments lourds mais il n'avait pas été possible de les différencier les uns des autres.

Une nouvelle analyse de ces données a permis d'identifier la signature de l'un des éléments lourds composant cette boule de feu, démontrant par là-même que la collision des étoiles à neutrons s'accompagne de la créa-



*Ce montage de spectres obtenus avec l'instrument X-shooter sur le Very Large Telescope de l'ESO montre le comportement changeant de la kilonova dans la galaxie NGC4993 sur une période de 12 jours après la détection de l'explosion le 17 août 2017. Chaque spectre couvre une gamme de longueurs d'onde allant du proche ultraviolet au proche infrarouge et révèle à quel point cet objet a rougi alors que sa luminosité diminuait. (ESO/E. Pian et al./S. Smartt & ePESSTO)*

tion de cet élément. Sur Terre le strontium est naturellement présent dans le sol et se trouve concentré dans certains minéraux. Ses sels sont utilisés pour conférer aux feux d'artifices une couleur rouge vif.

Les astronomes connaissent, depuis les années 1950, les processus physiques donnant lieu à la création des éléments chimiques. Au fil des décennies, ils ont découvert les sites cosmiques de chacune de ces forges nucléaires, à l'exception d'une seule. Les processus conduisant à la formation des éléments chimiques se produisent pour la plupart au cœur des étoiles ordinaires, lors des explosions de supernovæ, ou dans les enveloppes externes des vieilles étoiles. Jusqu'à présent, on ignorait la localisation du processus ultime – la capture rapide de neutrons, responsable de la création des éléments les plus lourds du tableau périodique.

Lors du processus de capture rapide de neutrons, un noyau atomique absorbe assez de neutrons pour permettre la création d'éléments très lourds. La plupart des éléments chimiques sont produits dans les étoiles. La formation d'éléments plus lourds que le fer, comme le strontium, requiert toutefois des températures bien plus élevées et la présence de nombreux neutrons libres. La capture rapide de neutrons ne se produit naturellement que dans des environnements extrêmes.

Les astronomes sont maintenant en mesure d'établir un lien direct entre la création d'un nouvel élément par capture de neutrons et la fusion d'étoiles à neutrons, confirmant par là-même que les étoiles à neutrons sont composées de neutrons, et associant le processus de capture rapide de neutrons à ces fusions.

Les scientifiques commencent à peine à mieux comprendre les fusions d'étoiles à neutrons et les kilonovæ. En raison de leur connaissance limitée de ces nouveaux phénomènes et d'autres interrogations soulevées par les spectres acquis par l'instrument X-shooter lors de l'explosion, les astronomes n'étaient pas en mesure d'identifier les éléments chimiques individuels jusqu'à présent. C'est maintenant chose faite.