



L'astronomie dans le monde

ESO/VLT

Disques protoplanétaires

Basé sur un communiqué ESO

SPHERE, un instrument récent dédié à la recherche d'exoplanètes installé sur le VLT de l'Observatoire de Paranal de l'ESO a été utilisé pour mieux comprendre l'évolution des jeunes systèmes planétaires.

SPHERE figure depuis peu parmi les multiples instruments installés sur le VLT (sa « première lumière » date de juin 2014). Les technologies récentes dont il est équipé offrent un outil puissant d'imagerie directe et détaillée des disques protoplanétaires. L'instrument associe un système d'optique adaptative avancé destiné à corriger la distorsion atmosphérique, un coronographe qui bloque en grande partie la lumière en provenance de l'étoile centrale, et enfin une combinaison d'imagerie différentielle et de polarimétrie qui permet d'isoler la lumière en provenance des structures du disque.

La découverte, ces dernières années, à un rythme exponentiel, d'un nombre croissant d'exoplanètes confère à ce champ d'études une formidable dynamique. Nous savons aujourd'hui que les planètes se constituent à par-

tir de disques de gaz et de poussière étendus entourant des étoiles jeunes. Leurs dimensions peuvent atteindre des centaines de millions de kilomètres. Au fil du temps, les particules piégées dans le disque protoplanétaire entrent en collision, se combinent les unes aux autres et donnent éventuellement naissance à des objets de dimensions planétaires. Toutefois, les détails de l'évolution de ces disques de formation planétaire demeurent en grande partie méconnus.

L'interaction entre les disques protoplanétaires et les planètes en formation contribue à façonner les disques, à leur attribuer la forme d'anneaux étendus, les munir de bras spiraux ou bien les creuser de vides plus ou moins profonds. Le lien entre ces structures et les planètes qui les sculptent reste mal connu. D'où l'intérêt, pour les astronomes, d'étudier ces formes remarquables.

À titre d'exemple, RXJ1615 est une étoile jeune de la constellation du Scorpion, distante de 600 années-lumière. Les astronomes lui ont découvert un système complexe d'anneaux concentriques dont la forme – à une échelle bien plus grande toutefois – évoque celle des anneaux de Saturne. Ce disque semble bien avoir été façonné par des



planètes encore en cours de formation. Une telle sculpture annulaire au sein d'un disque protoplanétaire n'avait été que rarement observée auparavant. Plus excitant encore : le système dans son ensemble paraît n'être âgé que d'un million huit cent mille ans. L'âge du disque confère à RXJ1615 un caractère tout à fait exceptionnel. La plupart des autres disques protoplanétaires détectés à ce jour sont en effet relativement âgés ou évolués.

Ce résultat inattendu a rapidement fait écho à une autre découverte concernant l'étoile jeune HD97048 située dans la constellation du Caméléon, à environ 500 années-lumière. Une analyse minutieuse a permis de conclure que le jeune disque qui entoure cette étoile s'est également constitué en anneaux concentriques.

La symétrie de ces deux systèmes contraste avec celle de la plupart des autres systèmes protoplanétaires qui montrent une multitude de bras spiraux asymétriques, de vides et de vortex. Ces découvertes augmentent donc significativement le nombre de systèmes connus ayant de multiples anneaux parfaitement symétriques.

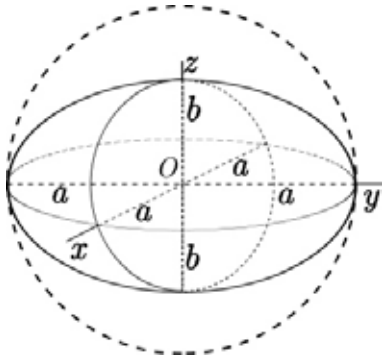
Une image spectaculaire de disque asymétrique – structure la plus fréquemment rencontrée – a été révélée par d'autres astronomes. Il s'agit d'un disque entourant l'étoile HD135344B distante de 450 années-lumière. Bien que cette étoile ait été bien étudiée par le passé, SPHERE a permis de voir le disque protoplanétaire de l'étoile de manière bien

Ces trois disques planétaires ont été observés au moyen de l'instrument SPHERE qui équipe le Very Large Telescope de l'ESO. Ces observations avaient pour objectif de mieux connaître l'évolution des systèmes planétaires naissants. (ESO)

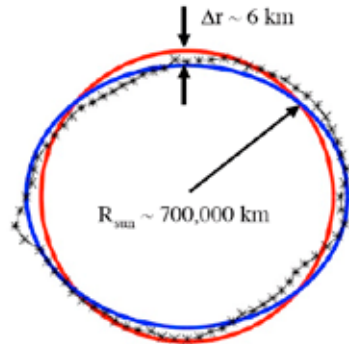
plus détaillée qu'auparavant. La vaste cavité centrale et les deux grandes structures en bras spiraux sont supposées avoir été créées par une ou plusieurs protoplanètes massives, destinées à devenir des planètes de type Jupiter.

En outre, quatre traces sombres, vraisemblablement des ombres générées par le mouvement de la matière au sein du disque de HD135344B, ont été observées. L'une des stries a sensiblement changé d'aspect dans les mois séparant les périodes d'observation – il s'agit là d'un rare exemple d'observation, en temps réel, d'une évolution planétaire, qui fait écho aux changements survenus dans les régions internes du disque inaccessibles à SPHERE. Ces ombres mouvantes offrent non seulement de belles images, mais également un moyen inédit de sonder la dynamique des régions internes du disque.

Toutes ces observations montrent que l'environnement complexe et changeant des disques qui entourent les étoiles jeunes peut encore offrir de belles et surprenantes découvertes.



Ellipsoïde de révolution. Un astre tournant autour de l'axe Oz s'aplatit sous la forme d'un ellipsoïde avec un rayon équatorial a plus grand que le rayon polaire b . (Wikipedia)



Variations locales de la forme du Soleil. L'écart moyen par rapport au cercle parfait (en rouge) est représenté en bleu. Il s'agit d'une moyenne sur trois mois. Une moyenne sur dix jours (croix noires) montre l'apparition de perturbations locales. Les écarts au cercle sont exagérés par un facteur 10 000. (NASA)

Rondeur naturelle

L'étoile Kepler 11145123 serait l'astre – voire l'objet naturel – le plus parfaitement sphérique mesuré jusqu'à présent. L'étude de ses vibrations montre une différence de 3 km seulement entre les rayons polaire et équatorial qui sont d'environ 1,5 million de km.

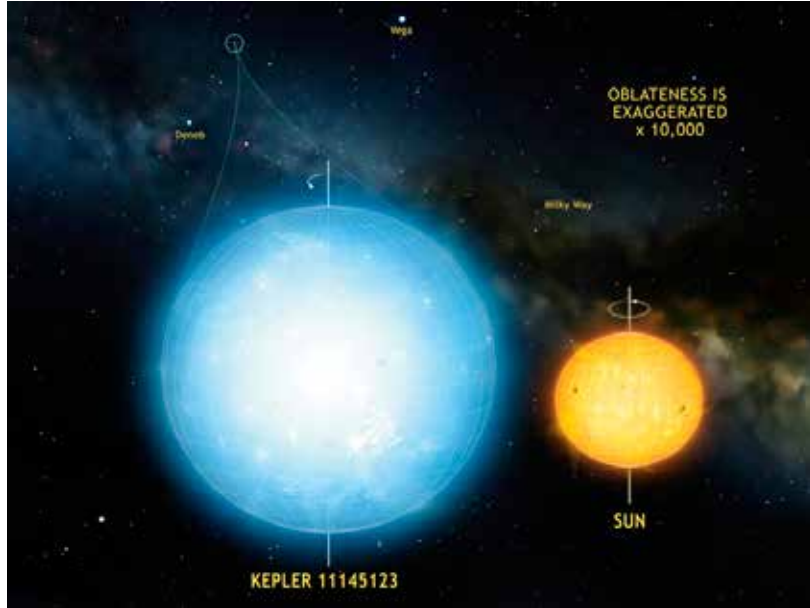
Les étoiles et les planètes sont soumises à diverses forces qui les façonnent. C'est évidemment la gravité qui domine. C'est elle qui les a créées en rassemblant la matière d'un nuage et c'est elle qui les maintient sous une forme plus ou moins sphérique. Mais d'autres influences s'exercent et, au premier rang, la rotation qui aplatit la sphère en un ellipsoïde de révolution – c'est l'effet « axifuge ». Cet aplatissement est habituellement chiffré comme le rapport entre la différence des rayons et le rayon équatorial $(a-b)/a$.

Saturne, effectuant sa rotation en une dizaine d'heures montre un aplatissement de 10%, évident au premier regard. Mais Jupiter, plus grosse et tournant plus rapidement, n'est aplatie que de 6%. Saturne est beaucoup moins dense que Jupiter et la gravité résiste moins à l'expansion équatoriale. Le Soleil, quant à lui, est un modèle de rondeur. Sa forte gravité et sa

rotation lente lui assurent un aplatissement à peine mesurable, de l'ordre de 0,001%, selon une étude permise par le satellite RHESSI de la NASA. Notre étoile s'affirmait alors comme l'objet naturel le plus parfaitement sphérique du Système solaire. Mercure et Vénus, dont la rotation est très lente, sont elles aussi bien sphériques, avec un aplatissement d'au plus une centaine de mètres. On n'a pas encore de mesures suffisamment précises pour décider si elles battent le Soleil sur ce point.

D'autres paramètres que la rotation entrent en ligne de compte. La surface du Soleil varie constamment sous l'effet des champs magnétiques, ce qui donne des bosses et des fosses d'amplitude comparable à l'aplatissement général et compliquent la détermination de celui-ci.

Les astres rocheux de grande taille ne sont pas exempts de cette déformation. La cohésion des matériaux ne peut lutter contre la gravité, ce qui fait qu'à partir de dimensions de 600 ou 800 kilomètres, toutes les planètes sont rondes – c'est d'ailleurs un des critères imaginés par l'Union Astronomique Internationale



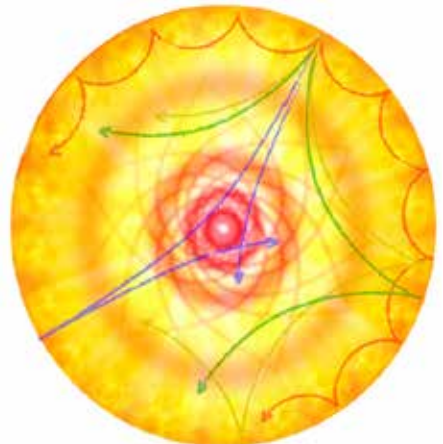
Comparaison des dimensions et de l'aplatissement du Soleil et de KIC 11145123. (Mark A.Garlick)

pour autoriser les astronomes à appeler planète une planète. La cohésion ne peut, elle non plus, lutter contre l'effet axifuge. Ainsi la Terre a un aplatissement de 21 kilomètres soit 0,3%. À cette échelle, les roches adoptent la même forme d'équilibre qu'un fluide de même densité.

Des étoiles en rotation rapide doivent être très aplaties. Seules quelques-unes ont pu être mesurées directement par interférométrie. C'est le cas d'Altaïr qui montre un bourrelet équatorial de 14% mais, le plus souvent, les étoiles sont trop lointaines pour être distinguées comme autre chose qu'un point. C'est la spectroscopie qui vient alors à la rescousse en permettant de déterminer la vitesse de rotation. C'est grâce à l'effet Doppler mesuré sur les spectres qu'on a pu voir que Régulus A tourne à une vitesse de plus de 300 kilomètres à la seconde à l'équateur. Ce n'est pas loin de la vitesse de rupture, là où la gravitation ne peut retenir la matière. L'aplatissement de l'astre doit être considérable, de l'ordre de 30%.

Au contraire, certaines étoiles tournent très lentement, encore plus lentement que le

Propagation des ondes acoustiques dans une étoile après réflexion sur la surface. (IAC)



Soleil. On en connaît même qui, observées depuis des dizaines d'années, n'ont pas encore effectué une révolution entière. On peut imaginer que certaines d'entre elles sont plus parfaitement rondes.

KIC 11145123, l'une des cibles de la mission première du télescope spatial Kepler tourne sur elle-même en cent jours et on a pu estimer son aplatissement à 0,0002%, cinq fois moins que celui du Soleil. On n'a bien sûr pas obtenu cette mesure par l'observation interférométrique. Ce sont les vibrations qui ont trahi sa forme. Tout comme le timbre d'un instrument de musique dépend de sa géométrie, celui de l'étoile dépend de sa structure et de sa forme exactes. L'astroséismologie est la science qui s'occupe de l'analyse des vibrations stellaires, et si l'objectif principal de Kepler était la découverte de planètes par leurs transits éventuels, il écoutait aussi le chant de milliers d'étoiles pour en déterminer la structure interne. La mesure des fréquences – des « modes » – de vibration donne le rayon en fonction de la latitude, tout comme les notes d'un violon donnent la longueur d'une corde. Le résultat pour KIC 11145123 est un aplatissement trois fois moindre que ce que les astronomes attendaient au vu de sa vitesse de rotation. On pense qu'un champ magnétique enserre l'équateur et contribue à maintenir la perfection de cette sphère.

Beaucoup d'étoiles Kepler attendent d'être analysées de cette manière et il est probable que le record de rondeur de KIC 11145123 ne tiendra pas très longtemps.

Galaxie Toile d'Araignée

Basé sur un communiqué VNRS/INSU

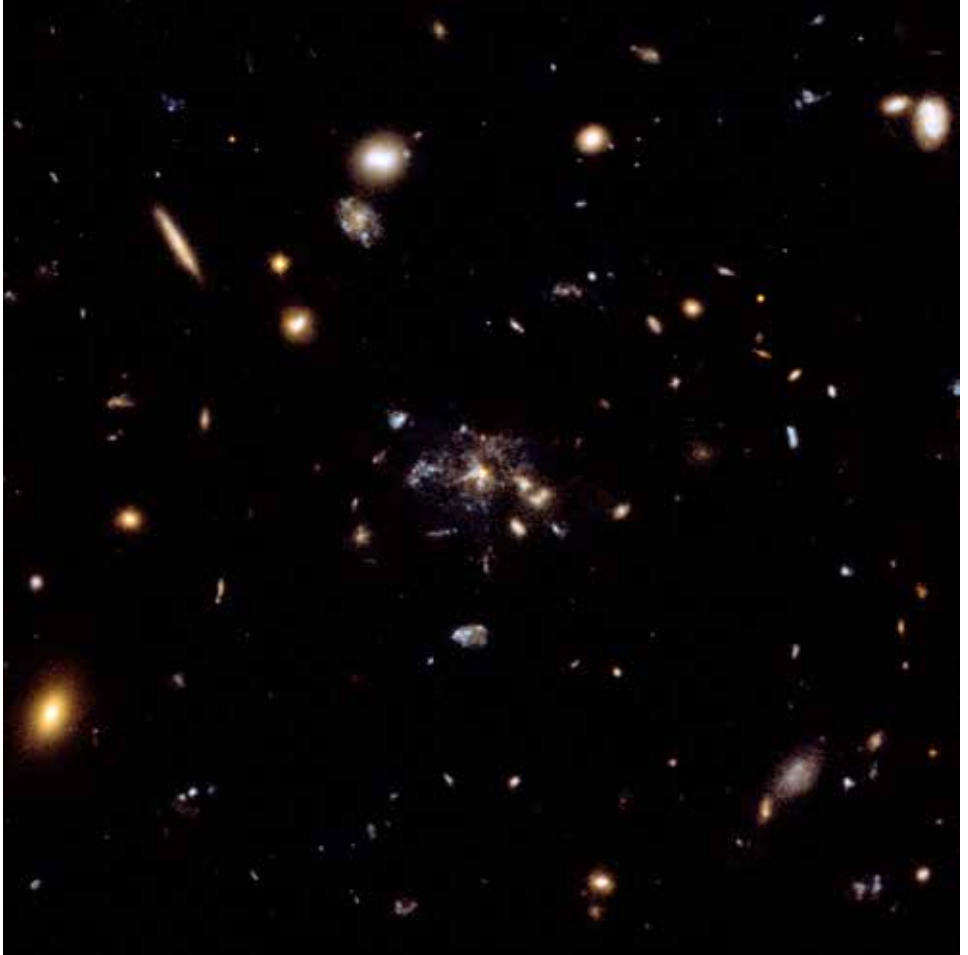
Les plus grosses galaxies de l'Univers, celles qui rassemblent plusieurs milliers de milliards d'étoiles, se concentrent au sein d'amas de centaines, voire de milliers d'autres galaxies. Les scientifiques pensaient jusqu'ici que ces super-galaxies se formaient en avalant leurs cousines plus petites, captées et violemment absorbées sous l'effet de la gravité. Afin de mieux comprendre le phénomène,

les astronomes se sont intéressés à un amas de galaxies situé à 10 milliards d'années-lumière de la Terre. Il abrite en son centre une galaxie géante en formation, nommée « The Spiderweb » (« la Toile d'Araignée ») car elle est entourée d'un réseau de plus petites galaxies en interaction gravitationnelle¹. Grâce aux radiotélescopes Karl G. Jansky VLA² et, surtout, ATCA³, les astronomes ont réalisé que les galaxies de l'amas baignent dans un nuage géant de gaz froid qui les alimente en matière. On ignore cependant comment ce nuage est structuré et comment il s'est formé. On sait en revanche qu'il s'étend tout autour des galaxies comme un halo, avec une masse de 100 milliards de fois celle du Soleil et une température de –200°C. Il est principalement composé de dihydrogène (H₂, la forme moléculaire normale de l'hydrogène), qui alimente la formation des étoiles au sein de l'amas. Il s'agit en effet du matériau de base à partir duquel se constituent les étoiles et les galaxies. Comme ce gaz est difficile à détecter, les astronomes se sont focalisés sur un gaz traceur, le monoxyde de carbone, et en ont déduit la masse du nuage de dihydrogène. Ils ont ainsi trouvé une partie des atomes manquants de l'univers qui échappaient jusqu'à maintenant à une détection directe. Cette découverte va donc pousser les astronomes à revoir leur conception de la formation des galaxies massives dans l'Univers jeune.

1 Voir *Le Ciel*, décembre 2014, p. 545.

2 Very Large Array, ou très grand réseau (National Radio Astronomy Observatory), situé au Nouveau-Mexique. Il a été baptisé en l'honneur du découvreur des ondes radio émises par la Voie lactée.

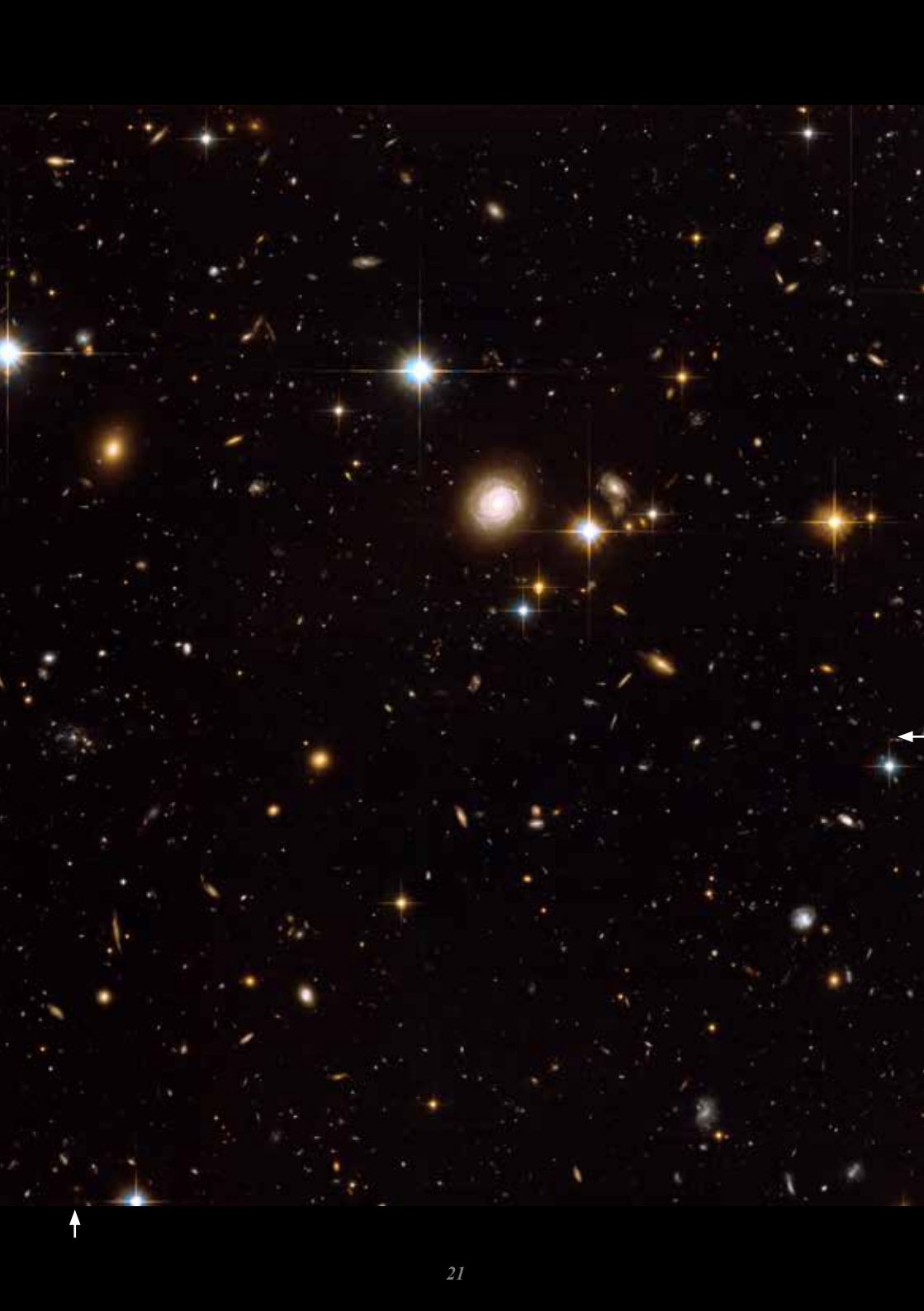
3 Australia Telescope Compact Array, ou réseau australien compact de télescopes (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation), implanté en Nouvelle-Galles-du-Sud.



La galaxie Spiderweb (PGC 2826829, MRC 1138-262) est une galaxie irrégulière dotée d'un redshift de 2,156, ce qui la date de 10,6 milliards d'années. Image obtenue par le télescope spatial. (NASA/Hubble Space Telescope)

Aux pages 20-21 on peut voir la galaxie Spiderweb à droite du centre dans le champ très peuplé d'un amas. (NASA, ESA, G. Miley et R Overzier/Leiden Observatory; the ACS Science Team; Davide De Martin/ESA/Hubble)





Les premiers résultats d'ExoMars

La caméra CaSSIS (Colour and Stereo Surface Imaging System), embarquée à bord de la sonde européenne ExoMars TGO (Trace Gas Orbiter), a capturé ses premières images à haute résolution de la surface de Mars depuis sa mise en orbite le 19 octobre. Elles ont été obtenues lors du passage de la sonde à proximité du canyon Valles Marineris et des grands volcans martiens.

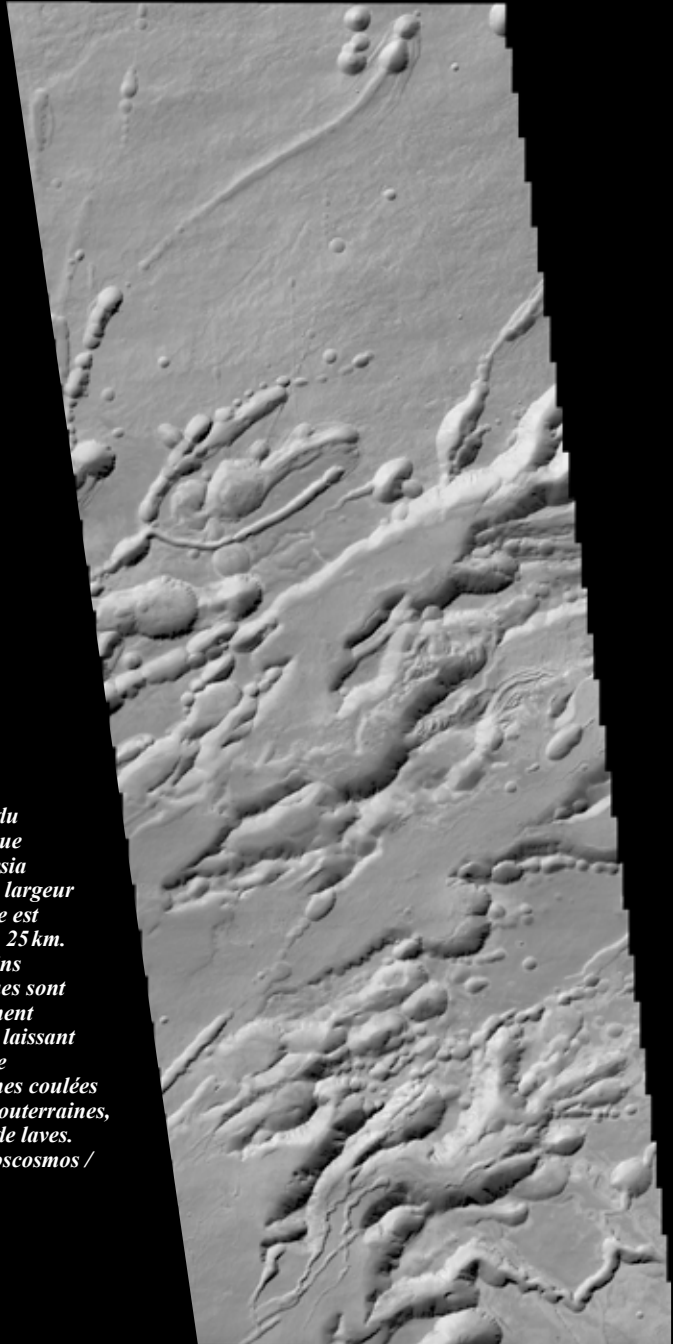
CaSSIS permet des prises de vue couleur en stéréo et utilise les deux images obtenues en même temps pour reconstruire la topographie de la planète.

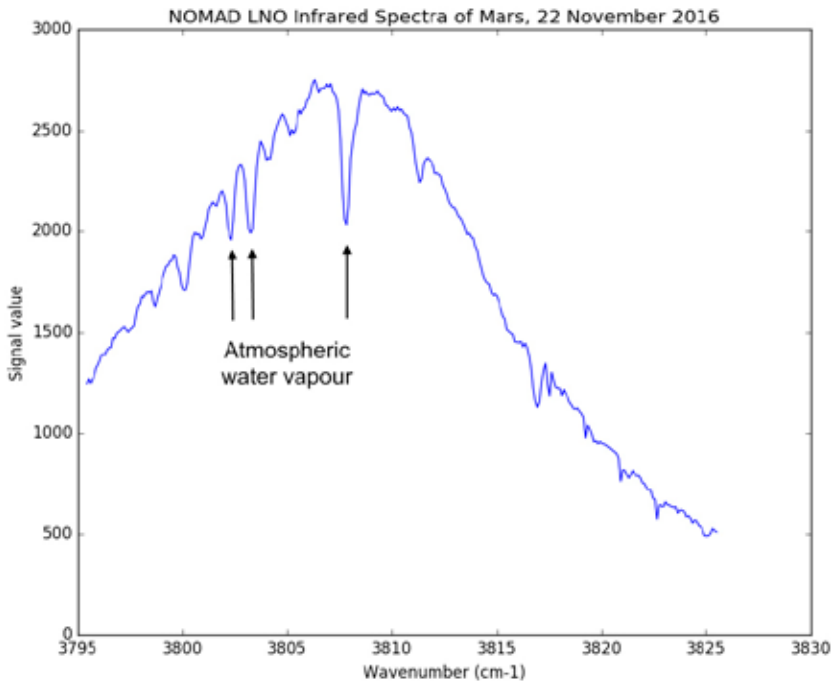
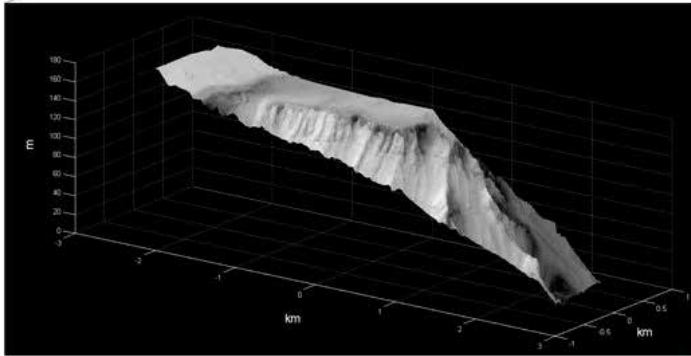
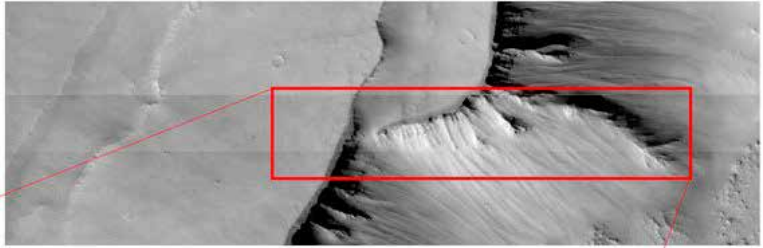
Image d'un cratère de 1,4 km sur le rempart d'un cratère bien plus grand. Elle a été acquise à la résolution de 7 m 20 par pixel. (ESA/Roscosmos/CaSSIS)





Versants du gigantesque volcan Arsia Mons. La largeur de l'image est d'environ 25km. Les terrains volcaniques sont partiellement effondrés laissant apparaître d'anciennes coulées de laves souterraines, ou tubes de laves.
(ESA / Roscosmos / CaSSIS)





À gauche, en haut : image et reconstruction 3D d'un versant du canyon de Noctis Labyrinthus. La topographie a pu être calculée avec une précision d'environ 2 mètres. (ESA/Roscosmos/CaSSIS)

À gauche, en bas, premier spectre infrarouge pris par ExoMars. Ci-dessous, premier spectre visible-infrarouge. (ESA/IASB/NOMAD)

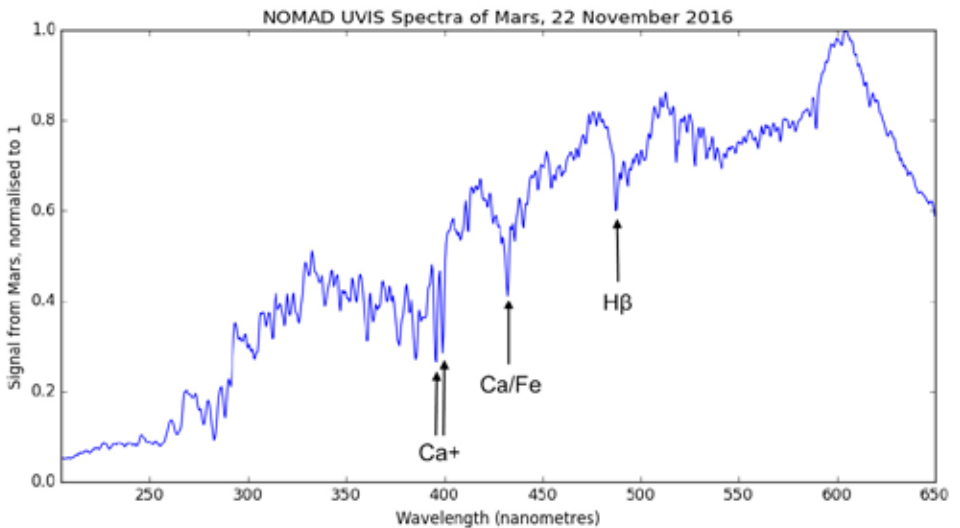
En même temps, l'instrument NOMAD d'ExoMars – principalement financé par la Belgique et piloté par l'Institut royal d'Aéronomie Spatiale (IASB) – livrait ses premiers résultats sur l'atmosphère martienne. Son seuil de détection est inférieur de plusieurs ordres de grandeur à celui des instruments précédents. On s'attend donc à mieux connaître la composition des gaz entourant la Planète rouge.

Deux orbites ont d'abord été consacrées à la calibration et au check-up des instruments, ce qui a permis de constater son excellent état.

Le premier spectre infrarouge de l'atmosphère montre des bandes d'absorption dues à la vapeur d'eau. Ces spectres permettront de mesurer et de localiser l'eau mais aussi d'autres molécules comme le méthane.

Le premier spectre dans les domaines ultraviolet et visible montre également des absorptions atmosphériques ainsi que la signature du spectre solaire.

Ces données livreront des informations sur les processus se déroulant dans l'atmosphère martienne ainsi qu'à la surface de la planète. Elles seront aussi d'un grand intérêt pour préparer de futures missions robotiques ou humaines.



Biréfringence du vide

Basé sur un communiqué ESO

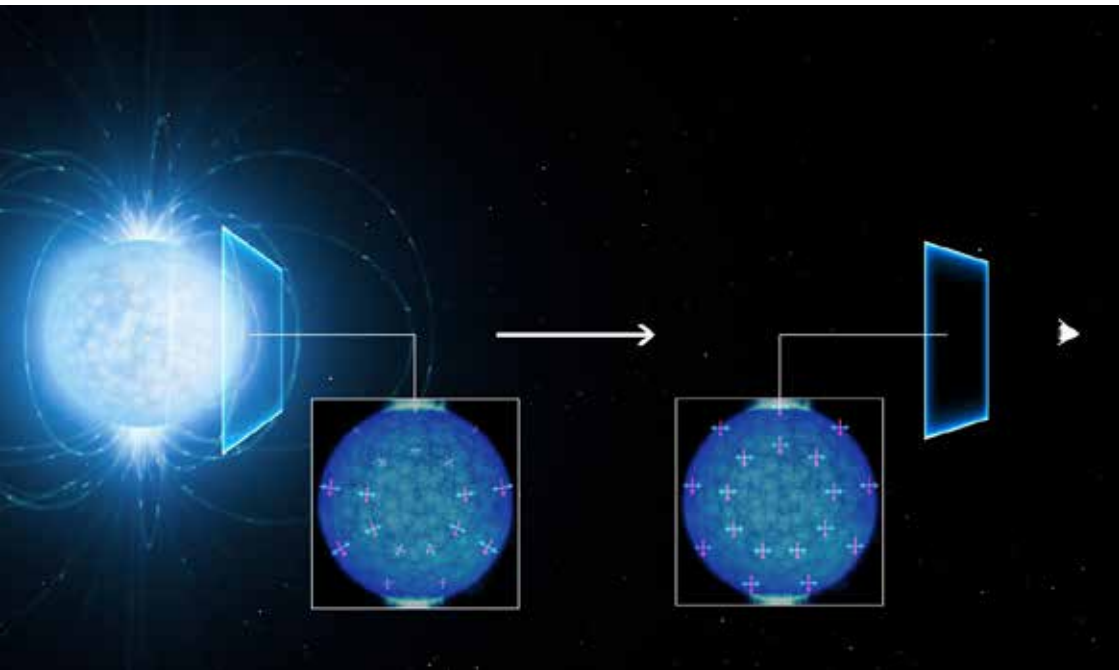
RX J1856.5-3754 est l'une des sept étoiles à neutrons connues sous le sobriquet des sept magnifiques. Ce sont des étoiles à neutrons isolées (INS), dépourvues de tout compagnon stellaire, qui n'émettent aucun rayonnement radio (à la différence des pulsars) et ne sont pas environnées de matière issue d'une supernova.

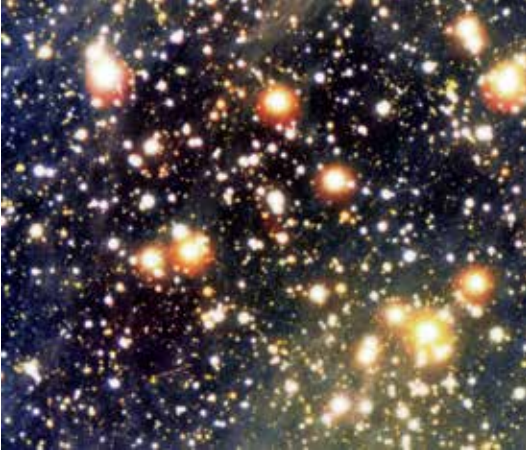
Les étoiles à neutrons sont les vestiges des noyaux extrêmement denses d'étoiles massives – de masse supérieure à 10 masses solaires – qui ont explosé en supernovæ. Elles sont dotées de champs magnétiques extrêmes, des milliards de fois plus puissants que celui du Soleil, qui transpercent leur enveloppe externe et baignent leur environnement.

Du fait de leur intensité, ces champs affectent les propriétés de l'espace vide situé en périphérie de l'étoile. En règle générale, le terme « vide » désigne un espace totalement vierge, que la lumière peut traverser sans

subir la moindre perturbation. Toutefois, en électrodynamique quantique (QED) – cette théorie quantique qui décrit l'interaction entre particules de lumière et corpuscules chargés tels que les électrons – l'espace est rempli de particules virtuelles qui apparaissent et disparaissent à chaque instant. Les champs magnétiques très intenses sont susceptibles de modifier cet espace, et donc de modifier la polarisation de la lumière qui le traverse.

Vue d'artiste montrant comment la lumière provenant d'une étoile à neutrons très magnétique se polarise linéairement en traversant le vide qui l'entoure. Cela suggère que l'espace autour de l'étoile est sujet au phénomène quantique de biréfringence prédit par la théorie électrodynamique quantique. Les directions des champs magnétique et électrique sont indiquées respectivement en rouge et en bleu. Les simulations montrent comment elles s'alignent dans une direction privilégiée en passant dans le vide près de l'étoile à neutrons.
(ESO/L. Calçada)





Le champ de l'étoile à neutrons RX J1856.5-3754 et la nébuleuse conique associée. Image composite créée à partir d'expositions prises au VLT dans trois filtres avec l'instrument FORS2. L'étoile est exactement au centre. La marque d'un astéroïde trahit les différentes poses de couleurs différentes. (ESO)

Selon la QED, un vide fortement magnétisé se comporte à l'image d'un prisme vis-à-vis de la propagation de la lumière, et produit un effet baptisé biréfringence du vide.

La QED a donné lieu à la formulation de nombreuses hypothèses qui ont pu être confirmées. Toutefois, le concept de biréfringence du vide n'a pour l'instant pas trouvé le moindre écho expérimental. Les expériences de laboratoire menées ces 80 dernières années – depuis sa formulation au sein d'un article signé par Werner Heisenberg (auteur du célèbre principe d'incertitude) et Hans Heinrich Euler – n'ont effectivement pas permis de le mettre en évidence.

Cet effet ne se manifeste qu'en présence de champs magnétiques extrêmement puissants, tels ceux qui règnent en périphérie d'étoiles à neutrons. Ce qui témoigne, là encore, des formidables laboratoires d'étude des lois fondamentales de la nature que constituent les étoiles à neutrons. L'observation de ces objets semblait donc tout indiquée pour tenter de détecter le phénomène.

Bien qu'elle soit l'une des étoiles à neutrons les plus proches (elle est distante de quelque 400 années-lumière), RX J1856.5-3754 se caractérise par une luminosité extrêmement faible. Pour pouvoir observer cette étoile dans le domaine visible, les astronomes ont donc été contraints d'utiliser l'instrument

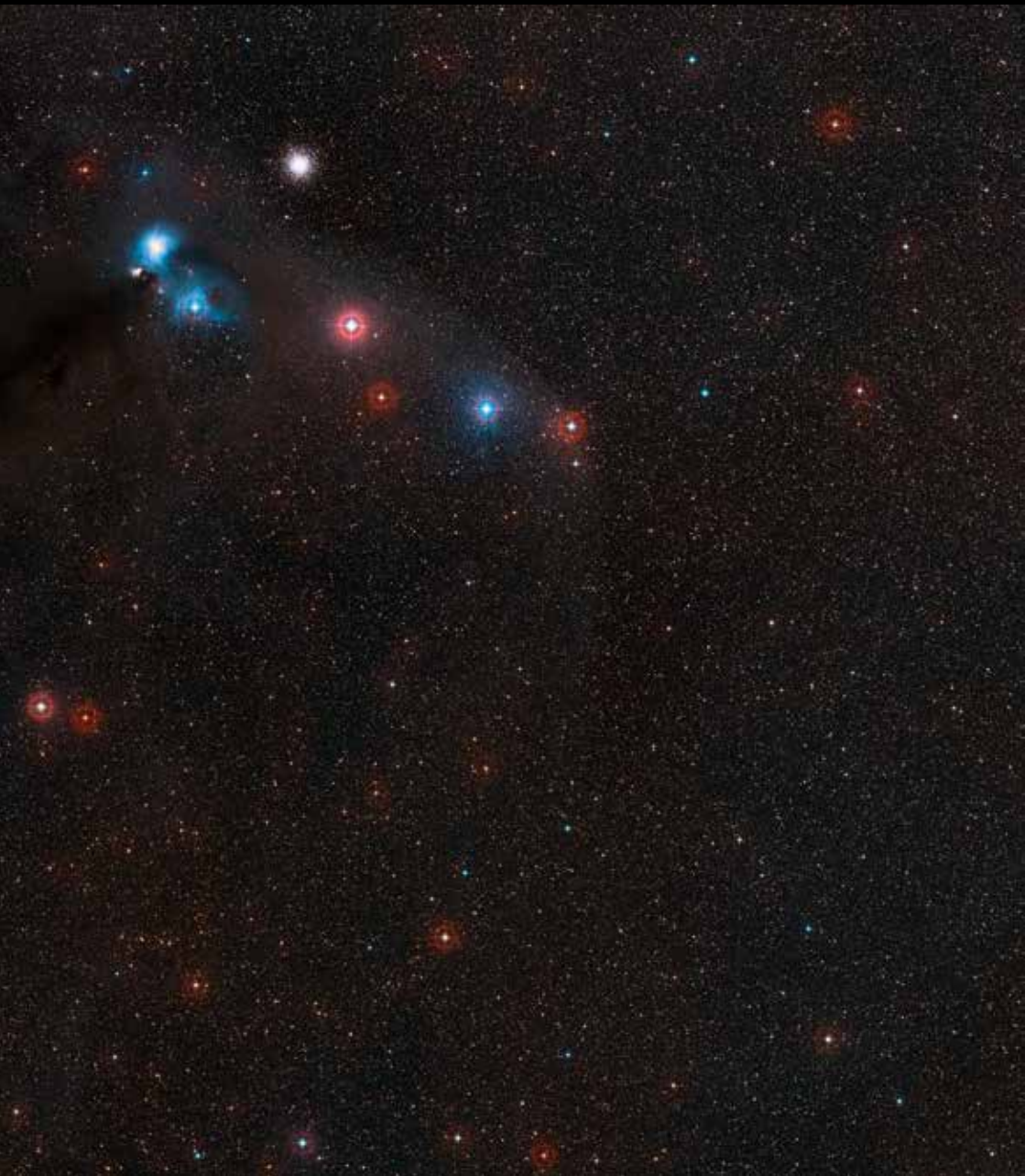
FORS2 qui équipe le VLT, poussant le télescope à sa limite technologique.

L'analyse minutieuse des données révèle une polarisation linéaire d'environ 16% – ce qui est significatif – qu'ils ont interprétée comme la résultante directe de la biréfringence du vide en périphérie de RX J1856.5-3754. Il s'agit de l'objet le plus faiblement lumineux dont on a pu mesurer la polarisation du rayonnement.

D'autres processus peuvent polariser la lumière stellaire au cours de son déplacement – la polarisation résultant de la diffusion par les grains de poussière par exemple. Les astronomes les ont considérés soigneusement avant de les éliminer un à un, aucun d'eux ne leur apparaissant susceptible d'avoir généré le signal observé.

Cette étude réalisée avec le VLT apporte le tout premier élément de preuve observationnelle en faveur de ces types d'effets QED censés se produire au sein de champs magnétiques extrêmement puissants.

Les mesures de polarisation effectuées au moyen de télescopes plus perfectionnés, tel l'E-ELT, l'European Extremely Large Telescope de l'ESO, pourraient permettre de tester les prédictions de la QED relatives aux effets de la biréfringence du vide dans la périphérie d'un plus grand nombre d'étoiles à neutrons. Cette mesure, effectuée pour la toute première fois en lumière visible, ouvre aussi la voie à de semblables détections dans le domaine des rayons X.



Champ de l'étoile à neutrons RX J1856.5-3754 dans la constellation de la Couronne australe, une région du ciel contenant d'autres objets intéressants comme les nébulosités autour de la variable R CrA (en haut à gauche) et l'amas

globulaire NGC 6723. RX J1856.5-3754 est au centre de l'image mais est trop faible pour être visible ici. (ESO/Digitized Sky Survey 2, Davide De Martin)