

L'astronomie dans le monde

Jupiter

La caractéristique la plus fameuse de Jupiter est sa Grande Tache rouge (GTR) et l'une des questions fondamentales la concernant est son ancrage dans l'atmosphère. Jusqu'à quelle profondeur pénètre ce tourbillon? Les données de la sonde Juno indiquent que les racines de cette tempête plongent à 300 kilomètres dans l'atmosphère. Les mesures ont été faites avec l'instrument MWR (MicroWave

La Grande Tache rouge de Jupiter vue par la caméra JunoCam de la sonde Juno. Une animation a été réalisée au moyen d'un modèle des vents dérivé des mesures obtenues par Voyager et par des télescopes au sol. (NASA/JPL-Caltech/SwRI/MSSS/Gerald Eichstadt/Justin Cowart)

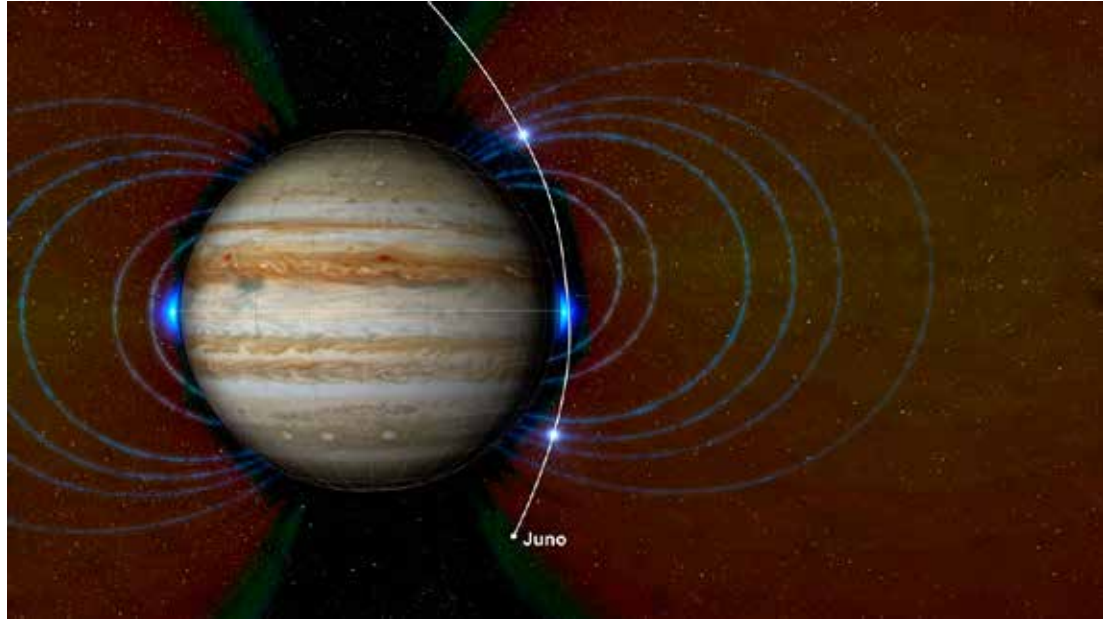
Radiometer) qui permet de « voir » loin en dessous des nuages.

La Grande Tache rouge est un gigantesque ovale de nuages rougeâtres tournant dans le sens antihorlogique dans l'hémisphère sud de Jupiter. Elle est large de 16 000 kilomètres soit 1,3 fois le diamètre de la Terre. Les vents à sa périphérie dépassent tout ce que l'on observe dans les tempêtes terrestres. À la base de la GTR, la température est plus élevée qu'au sommet. Cette différence de température explique la violence des vents.

L'avenir de la GTR est incertain. On la surveille depuis 1830 mais elle avait peut-être été déjà vue dès 1667. Au 19^e siècle elle était plus grosse que maintenant, avec une étendue de plus de deux diamètres terrestres. Lorsque les sondes Voyager l'ont observée en 1979,

Jupiter montrait une GTR plus grande que maintenant sur cette image prise par Pioneer 10 en 1974. (NASA)





***Une nouvelle ceinture de radiation a été découverte juste au-dessus des nuages de Jupiter. Des zones renfermant des ions lourds de haute énergie ont été découvertes aux latitudes élevées.
(NASA/JPL-Caltech/SwRI/JHU/APL)***

elle mesurait encore deux diamètres terrestres. Depuis, sa largeur a diminué d'un tiers et sa hauteur d'un huitième.

La sonde Juno a détecté une nouvelle zone de radiation autour de la planète géante, juste au-dessus de l'atmosphère, près de l'équateur. S'y agitent des ions d'hydrogène, d'oxygène et de soufre animés de vitesses proches de celle de la lumière et donc très énergétiques. Les scientifiques ne s'attendaient pas à trouver une ceinture de radiation aussi près de la planète. Seule l'orbite particulière de Juno, avec un « périjoive » très bas, a permis cette découverte. C'est l'instrument JEDI (Jupiter Energetic Particle Detector Instrument) qui a détecté ces ions lorsque Juno a traversé cette zone. On pense qu'ils proviennent des atomes neutres dispersés par les lunes Io et Europe. Les interactions avec la haute atmosphère de Jupiter en font des ions en leur arrachant des électrons.

Juno a trouvé des indices d'une autre zone de radiation : toute une population d'ions

lourds de haute énergie s'activant au bord interne de la ceinture d'électrons relativistes. Cette observation peut se faire lorsque Juno traverse la ceinture d'électrons à des latitudes élevées, des zones jamais encore explorées par des sondes spatiales. L'origine et la nature exacte des particules sont encore inconnues. C'est le bruit de fond élevé des images de la caméra SRU-1 (Stellar Reference Unit) qui suggère la présence de ces particules.

Lancée le 5 août 2011, Juno s'est mise en orbite autour de Jupiter le 4 juillet 2016. Il a effectué ses huitième et neuvième passages au périjoive le 24 octobre et le 16 décembre, à seulement quelques milliers de kilomètres au-dessus des nuages. À l'« apojoive » la sonde s'éloigne à plusieurs millions de kilomètres.

Les poussières de la comète 67P

Basé sur un communiqué CNRS

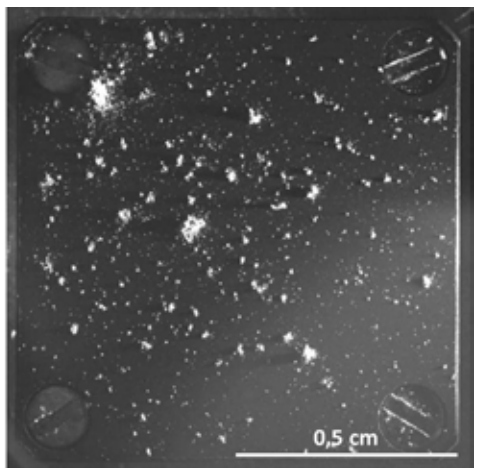
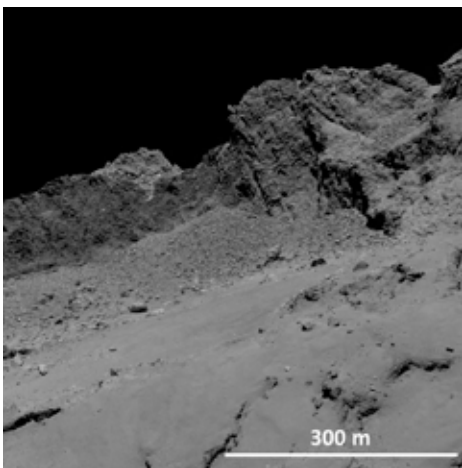
Les astronomes ont déterminé la composition élémentaire des poussières de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko explorée par la mission Rosetta de l'ESA. Ces mesures révèlent l'un des matériaux les plus riches en carbone et les moins altérés découvert lors de l'exploration du Système solaire. Ce carbone cométaire se trouve essentiellement sous forme de matière organique macromoléculaire et c'est donc principalement sous cette forme qu'il a pu être délivré sur la Terre primitive par les comètes et éventuellement contribuer à l'apparition de la vie. La sonde spatiale Rosetta de l'ESA a navigué pendant deux ans autour du noyau de la comète 67P et l'a scrutée dans les moindres détails. Plus d'un an après la fin de la mission (septembre 2016),

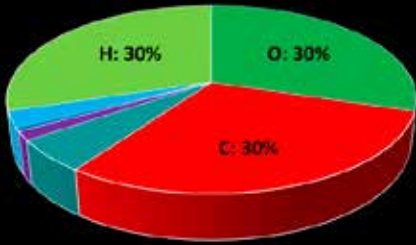
elle a déjà livré une multitude d'informations sur le noyau et son activité : sa taille, sa masse, la nature et les abondances des molécules présentes sous forme gazeuse dans la chevelure de la comète (vapeur d'eau, dioxyde de carbone, dioxygène et une multitude de petites molécules organiques, c'est-à-dire composées principalement de carbone, hydrogène, azote et oxygène). Les scientifiques connaissent maintenant presque dans les moindres détails l'apparence du noyau. Sa surface est très sombre, très pauvre en glaces, changeante, et présentant une géomorphologie complexe (des failles, des falaises, des gouffres etc.), mais le détail de sa composition chimique, et en particulier la quantification de son contenu carboné supposé être au moins en partie à l'origine de cette couleur sombre, restait jusqu'ici objet de débats et d'hypothèses.

À gauche, la surface du noyau cométaire vue par la sonde Rosetta. Les glaces condensées sous la surface s'échappent des profondeurs de la comète lorsque celle-ci est réchauffée à l'approche du Soleil. Les gaz produits entraînent avec eux de petites particules de matière solide qui peuvent être collectées et analysées par la sonde Rosetta.

À droite, une cible de collecte (1 cm × 1 cm) de l'instrument COSIMA montrant de minuscules fragments du noyau, de tailles allant jusqu'au millimètre, l'ayant heurtée. Toutes ces poussières sont constituées d'un mélange intime à 50/50 (en masse) de minéraux silicatés et de matériau organique.

(ESA/Rosetta /MPS pour OSIRIS Team, MPS /UPD /LAM /IAA /SSO /INTA /UPM /DASP /IDA, ESA/Rosetta /MPS pour COSIMA Team MPS /CSNSM /UNIBW /TUORLA /IWF /IAS /ESA /BUW, /MPE /LPC2E /LCM /FMI /UTU /LISA /UOFC /H&S)





COSIMA est un instrument se trouvant à bord de la sonde Rosetta. Il avait pour tâche de collecter les poussières submillimétriques éjectées par le noyau de la comète, les photographier, puis en analyser une partie par spectrométrie de masse « à temps de vol et ionisation secondaire » (TOF-SIMS). Un an après avoir révélé que la poussière de la comète contenait un matériau carboné de structure macromoléculaire, l'équipe scientifique de l'instrument COSIMA a pu déterminer la composition élémentaire moyenne de ces poussières et démontrer que ce matériau carboné représente près de la moitié de la masse de ces particules cométaires. L'autre moitié est constituée essentiellement de minéraux silicatés. Les mesures de COSIMA qui se sont étalées au long des deux années de la mission Rosetta montrent que toutes les poussières analysées présentent une composition similaire, quelles que soient leur date de collecte, leur taille ou leur morphologie, ce qui laisse penser qu'il s'agit là d'une propriété générale de tout le noyau, une forme de mémoire préservée du Système solaire. Les comètes comme 67P (ou précédemment la comète Halley) sont donc parmi les objets les plus riches en carbone du Système solaire. Les résultats obtenus à partir des mesures de COSIMA donnent un rapport d'abondance carbone sur silicium (C/Si) très proche du rapport solaire et indiquent l'absence d'une hydratation notable des phases minérales. Ces informations signent la nature

À gauche, la composition élémentaire moyenne des particules de poussière de la comète 67P. À droite, la répartition moyenne en masse des minéraux et du matériau organique dans ces poussières.

(ESA/Rosetta/MPS for COSIMA Team MPS/CSNSM/UNIBW/TUORLA/IWF/IAS/ESA/BUW/MPE/LPC2E/LCM/FMI/UTU/LISA/UOFC/HR&S)

primitive du matériau cométaire. Celle-ci a préservé quasi intacte la matière qui s'est accrétée et lui a donné naissance. Les comètes sont donc bien un témoignage des premiers temps du Système solaire.

Par ailleurs, au-delà de la spectaculaire diversité moléculaire observée pour la matière organique détectée en phase gazeuse, ces gaz et les glaces sublimées qui en sont à l'origine ne représentent qu'une très faible fraction de la matière cométaire totale. L'essentiel de la matière cométaire est constitué par le mélange intime de minéraux et de matière carbonée solide mesurée dans les poussières. Ainsi, les résultats de COSIMA montrent que la plus grande partie de la matière organique de la comète se trouve sous la forme de matière carbonée macromoléculaire. En conséquence, si les comètes ont joué un rôle dans l'apparition de la vie sur notre planète en y apportant en particulier de la matière riche en carbone, c'est sous cette forme complexe qu'elle y aura été essentiellement délivrée.

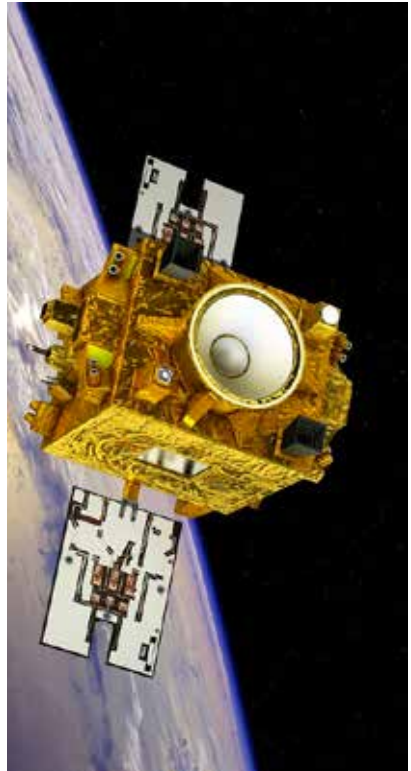
MICROSCOPE

Basé sur un communiqué CNRS

Les premiers résultats du satellite MICROSCOPE confirment la théorie d'Albert Einstein avec une précision inégalée. Alors que la meilleure mesure du principe d'équivalence n'avait pas été dépassée depuis 10 ans, les premiers résultats du satellite MICROSCOPE permettent de faire aujourd'hui dix fois mieux. Ils démontrent, avec une précision inégalée de $2 \cdot 10^{-14}$, que les corps tombent dans le vide avec la même accélération. Le principe d'équivalence demeurant à ce stade inébranlable, il s'agit de rien de moins qu'une nouvelle confirmation de la relativité générale proposée par Albert Einstein il y a plus d'un siècle. Selon cette théorie, espace et temps sont liés dans un espace-temps à quatre dimensions et la gravitation résulte d'une courbure de cet espace-temps déformé par la matière. Cette théorie de la gravitation a été encore vérifiée expérimentalement par la détection récente des ondes gravitationnelles. Mais la théorie quantique des champs, autre grande théorie du 20^e siècle, qui décrit de manière extrêmement fidèle le monde des particules et de l'infiniment petit, semble inconciliable avec la relativité générale. La recherche d'une théorie universelle « de la gravitation » et « quantique » est le Graal des physiciens du 21^e siècle. Certaines théories candidates prédisent une violation du principe fondateur de la relativité générale, l'équivalence entre gravitation et accélération, à un niveau très faible. MICROSCOPE repousse les limites d'un éventuel défaut de cette équivalence et apporte de nouvelles contraintes aux théories d'extension de la relativité générale. Après avoir analysé seulement 10% des données acquises, l'équipe qui analyse les données de MICROSCOPE, améliore la précision du test du principe d'équivalence d'un facteur dix ! Ce résultat permet de confirmer que l'universalité de la chute libre et donc le principe d'équivalence sont des principes non violés.

MICROSCOPE, *vue d'artiste.*
(CNES)

MICROSCOPE (MICRO Satellite à traînée Compensée pour l'Observation du Principe d'Équivalence) a été lancé le 25 avril 2016. La phase des mesures scientifiques a débuté en décembre 2016 et permis la collecte de 1 900 orbites utiles à la mesure du principe d'équivalence. C'est l'équivalent d'une chute de 85 millions de km, plus de la moitié de la distance Terre-Soleil. La performance du satellite a dépassé les prévisions. Plus de 1 900 orbites supplémentaires sont déjà disponibles, d'autres à venir, et devraient ainsi améliorer la performance de la mission pour se rapprocher de l'objectif de 10^{-15} . Ce premier résultat a une portée mondiale pour la physique et va certainement déboucher sur la révision des théories alternatives à la relativité générale.



L'expérience MICROSCOPE

(<https://microscope.cnes.fr/>)

Au 17^e siècle, Galilée imagine, sans la réaliser, une expérience du haut de la Tour de Pise où il laisse tomber en même temps deux objets de nature et de masse différentes. Dans sa théorie, les deux corps touchant le sol exactement au même moment, il en déduit que dans le vide, tous les corps tombent avec la même accélération, quelle que soit leur masse ou leur composition. C'est ce qu'on appelle l'universalité de la chute libre ou encore l'équivalence entre la masse pesante (sensible à l'attraction gravitationnelle) et la masse inerte (sensible au changement de mouvement). Cette observation sera érigée en principe, dit d'équivalence, par Albert Einstein qui en fera le fondement de sa théorie de la relativité générale.

Récemment vérifié avec un degré de précision relative de l'ordre de 10^{-13} , ce principe est toutefois encore mis à l'épreuve car les nouvelles théories – qui cherchent à concilier la gravitation avec les autres interactions fondamentales (nucléaire et électromagnétique) – prédisent qu'il pourrait

être violé à un niveau très faible. Le satellite Microscope (MICROSatellite à traînée Compensée pour l'Observation du Principe d'Équivalence) permettra d'aller encore plus loin et de le tester avec une précision de l'ordre de 10^{-15} . En effet, dans l'espace, il est possible d'étudier le mouvement relatif de deux corps en réalisant une chute libre la plus parfaite possible, à l'abri des perturbations dues à la Terre (notamment sismiques), et en mettant à profit le mouvement de chute libre permanent dont est animé un satellite en orbite, avec des mesures sur plusieurs mois d'affilée.

Pour cela, deux masses cylindriques concentriques constituées de matériaux différents – l'une en titane et l'autre avec un alliage de platine et de rhodium – sont minutieusement contrôlées afin de rester immobiles par rapport au satellite dans un double accéléromètre électrostatique différentiel. Si le principe d'équivalence est vérifié, les deux masses subissent la même accélération de contrôle. Si des accélérations différentes doivent être appliquées, cela mettra en évidence une violation du principe d'équivalence, ce qui constituerait alors un événement majeur pour la physique.



Galilée réalise sa fameuse expérience en présence du Grand Duc. Tableau de Luigi Catani (1762 – 1840). (Museo Galileo)

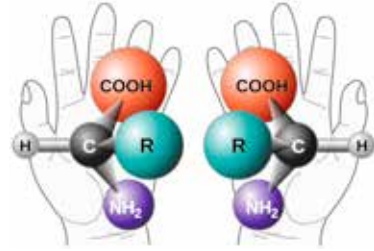
Chiralité

Basé sur un communiqué CNRS

En enfilant le gant droit dans la main gauche, on expérimente ce qu'on appelle la chiralité : deux formes en tout point semblables mais qu'on ne peut pas superposer puisqu'elles sont des images miroir différentes. Les molécules sont-elles droitières ou gauchères ? Cette propriété de chiralité est cruciale pour la vie sur Terre et, le cas échéant, dans l'Univers. Elle se retrouve un peu partout et à toutes les échelles, des particules élémentaires aux galaxies. Bien que les caractéristiques physiques des molécules chirales soient les mêmes, une forme est la plupart du temps favorisée par les organismes vivants, dans l'ADN ou les acides aminés, par exemple. Diverses pistes existent pour expliquer cette « homochiralité de la vie » mais aucune ne fait consensus. Les conséquences de ce phénomène sont pourtant immenses, en pharmacologie par exemple : les deux images miroir d'une molécule chirale peuvent avoir des effets thérapeutiques très différents.

Les propriétés des molécules chirales ont maintenant été analysées à l'échelle de l'attoseconde. Dans une expérience deux électrons s'élancent dans des directions opposées. Celui qui remporte la course a une avance d'à peine sept attosecondes. Soit sept précédé de 17 zéros avant la virgule, ou 7×10^{-18} seconde. Une différence si petite que jusqu'à présent il était impossible de la mesurer. Pourtant, elle constitue une signature de la chiralité des molécules dont s'échappent les électrons. Les équations théoriques prédisaient le phénomène, mais personne n'avait encore pu le prouver.

Dans cette étude, afin de révéler les propriétés subtiles des molécules miroir, les chercheurs ont étudié leur photoionisation, c'est-à-dire la manière dont elles perdent leurs électrons quand elles sont soumises à la lumière. La lumière produite par un laser ultrarapide est d'abord polarisée de façon circulaire, puis dirigée vers les molécules de camphre. Ainsi, le champ électromagnétique décrit une spirale régulière dont le sens peut être ajusté à loisir. Lorsque cette lumière



Molécule « chirale » (un acide aminé). Elle n'est pas superposable à son image dans un miroir. (Wikipedia)

en spirale atteint la molécule chirale, elle provoque l'éjection d'un électron qui suivra lui aussi une trajectoire en spirale. Dans le camphre sous forme gazeuse, les molécules sont orientées au hasard. La lumière du laser ne frappe donc pas toujours le même côté de la molécule chirale, et éjecte les électrons dans différentes directions. Pourtant, pour une image miroir donnée, les électrons sont éjectés davantage vers l'avant ou vers l'arrière de la direction de la lumière, selon son sens de polarisation, de la même façon qu'un écrou se déplace dans un sens ou l'autre selon la direction de la rotation. En mesurant très précisément l'éjection des électrons les scientifiques ont non seulement confirmé qu'un plus grand nombre d'électrons sont émis dans une direction, mais ils ont surtout découvert qu'ils sont émis sept attosecondes plus tôt que dans la direction opposée. Il y a donc une asymétrie dans la réactivité de la molécule de camphre lorsqu'elle est ionisée par la lumière polarisée circulairement. L'ionisation asymétrique des molécules chirales est une des explications possibles de l'homochiralité de la vie. La nouvelle expérience a ainsi capturé les premières attosecondes d'un processus qui, sur des milliards d'années d'évolution, pourrait avoir mené à une préférence pour certaines molécules gauches ou droites dans la chimie de la vie. Il faudra d'autres découvertes fondamentales comme celle-ci pour comprendre chaque étape de cette histoire où les événements se produisent à l'échelle de l'attoseconde.

Astéroïdes photographiés par SPHERE

Basé sur un communiqué ESO

L'instrument SPHERE installé au VLT de l'ESO au Chili a été utilisé pour photographier quatre astéroïdes de la ceinture principale d'astéroïdes située entre Mars et Jupiter, une région qui sépare les planètes rocheuses du Système solaire interne des planètes gazeuses et glacées du Système solaire externe.

Nommé d'après la déesse grecque Pallas Athena, (2) Pallas possède un diamètre d'environ 510 kilomètres et il représente 7% de la masse de la ceinture principale – si pesant qu'il était classifié auparavant comme une planète.

Avec un diamètre environ trois fois plus petit que celui de Pallas, (89) Julie est appelé ainsi en honneur de sainte Julie. Sa composition rocheuse a conduit à sa classification comme un astéroïde de type S (silicium).

(29) Amphitrite, découvert en 1854, est également un astéroïde de type S.

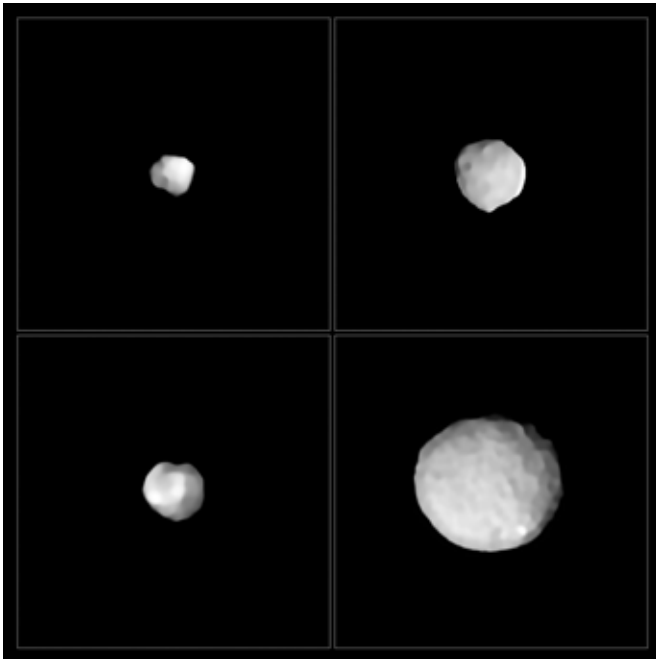
(324) Bamberga, bien qu'étant l'un des plus gros astéroïdes de type C de la ceinture principale avec un diamètre d'environ 220 kilomètres, ne fut découvert que tardivement en 1892 par Johann Palisa. Aujourd'hui, on pense que les astéroïdes de type C (carbone) ne se seraient pas formés in situ mais plus vraisemblablement dans le Système solaire externe au-delà de Jupiter. Ces derniers auraient abouti dans la ceinture principale à la suite de la migration des planètes géantes. Il en découle que ces objets pourraient être riches en glace.

Bien que la ceinture d'astéroïdes soit souvent représentée dans la science-fiction comme un endroit de violentes collisions, peuplé de gros rochers trop dangereux même pour le meilleur pilote de vaisseau spatial, c'est en fait un endroit essentiellement vide. Au total la ceinture d'astéroïdes ne contient que 4% de la masse de la Lune, dont environ la moitié est contenue dans ses quatre résidents principaux : Cérès, (4) Vesta, (2) Pallas et (10) Hygie.

Ces images collectées ne sont que le début d'une aventure qui va durer deux ans.

En effet, les quarante plus gros astéroïdes de la ceinture principale vont être imagés avec SPHERE. Ces données permettront de contraindre la densité de ces objets et donc leur structure interne, ainsi que la morphologie de leur surface. Elles permettront à terme de mieux comprendre l'origine de la diversité de la ceinture d'astéroïdes.

Images de quatre astéroïdes prises par l'instrument SPHERE installé au VLT de l'observatoire de Paranal de l'ESO au Chili. Ce sont, dans le sens des aiguilles d'une montre, en partant du haut à gauche : (29) Amphitrite, (324) Bamberga, (2) Pallas et (89) Julie. (ESO/Vernazza et al.)



Exoplanètes

La liste des planètes potentielles nichées dans les données du télescope spatial Kepler s'est encore allongée. En soumettant les courbes de lumière d'une série d'étoiles à une méthode d'analyse faisant appel à l'intelligence artificielle, les astronomes ont extrait quelques candidates intéressantes. Parmi celles-ci une huitième étoile pour le système de Kepler 90 situé à 2 550 années-lumière de nous. Cette planète, Kepler 90i, tourne autour de l'étoile en 14,4 jours. Elle est rocheuse, plus grande de 30% que la Terre et aussi chaude que Mercure.

Le système Kepler 90 offre quelques analogies avec le nôtre. L'étoile, de type G0V est assez comparable au Soleil (G5V), un peu plus massive, plus grosse et plus chaude que lui. Elle est plus jeune que le Soleil, âgée de seulement deux milliards d'années, contre quatre milliards et demi. Tout comme dans le Système solaire, les grosses planètes sont à l'extérieur et les petites à l'intérieur, mais les distances sont plus petites.

Les planètes de Kepler 90 offrent de nombreuses résonances orbitales, une situation qui semble favorisée par la présence de grosses planètes. Les rapports des périodes b:c, c:i et

i:d sont proches de 4:5, 3:5 et 1:4, respectivement. Les périodes de d, e, f, g et h sont pratiquement dans les proportions 2:3:4:7:11 et f, g et h dans les rapports 3:5:8.

Les astronomes ont « éduqué » leur réseau « neuronal » en l'appliquant à 15 000 cas déjà bien étudiés. Une fois au point, avec un taux de réussite de 96% ils ont attaqué les données de 670 étoiles déjà connues pour avoir plusieurs planètes. C'est là qu'ils pensaient avoir le plus de chance d'en trouver de nouvelles.

Kepler 90 n'est pas l'unique vedette de l'étude. Le système de Kepler 80 qui était connu pour renfermer cinq planètes s'en voit attribuer une sixième, Kepler 80g, d'une taille comparable à celle de la Terre. Avec quatre de ses voisines, cette planète forme une chaîne résonnante stabilisée par leur attraction mutuelle, à la façon des étoiles de Trappist-1.

La procédure d'analyse sera appliquée à l'ensemble des 150 000 étoiles observées par le télescope spatial Kepler.

Le système planétaire de Kepler 90 comparé au nôtre.
(NASA/Ames Research Center/Wendy Stenzel)



Cérès

Basé sur un communiqué NASA

La sonde Dawn nous a appris que la surface de la petite planète (ou grosse planète naine) Cérès est uniformément sombre avec cependant quelques exceptions notoires : des centaines de taches brillantes. Les scientifiques commencent à comprendre comment ces régions se sont développées.

Ces points brillants révèlent l'existence passée d'un océan souterrain et prouvent que, loin d'être un monde mort, Cérès est une planète bien active. Les processus qui ont créé les zones brillantes pourraient encore modifier la face de Cérès.

Les plus de 300 zones en question peuvent se répartir en quatre catégories.

La première comprend les zones les plus brillantes. Elles se trouvent au fond de cratères et l'exemple le plus célèbre de ceux-ci est Occator qui contient deux zones brillantes. Cerealia Facula, au centre du cratère, consiste en matériaux blancs recouvrant une excavation de 10 kilomètres de diamètre, elle-même renfermant un petit dôme. À l'est du centre d'Occator, on trouve une série de taches moins prononcées, plus diffuses, collectivement

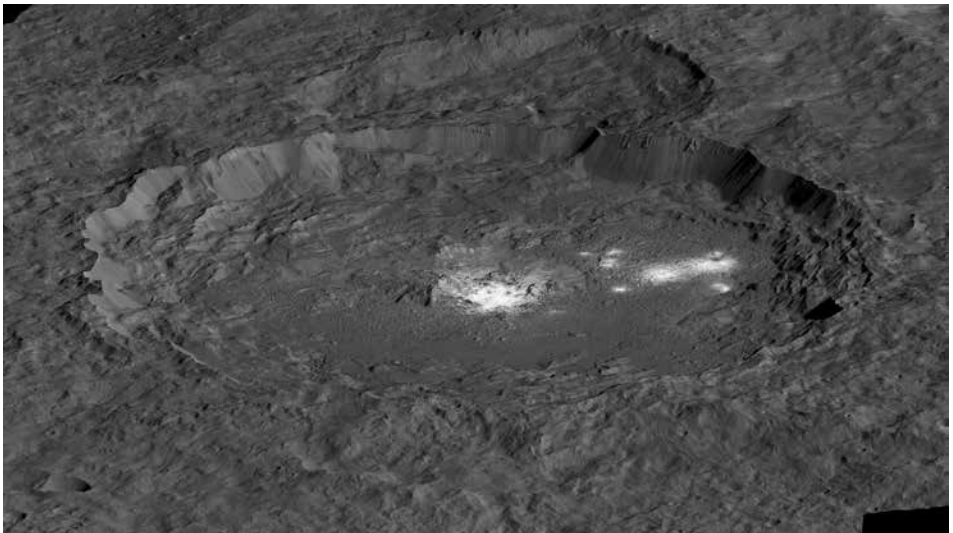
appelées Vinalia Faculae. Toute cette matière brillante est riche en sels et était probablement mélangée à de l'eau à une époque ancienne. Vue de près Cerealia Facula ne serait pas d'une blancheur éclatante mais ressemblerait plutôt à de la neige sale.

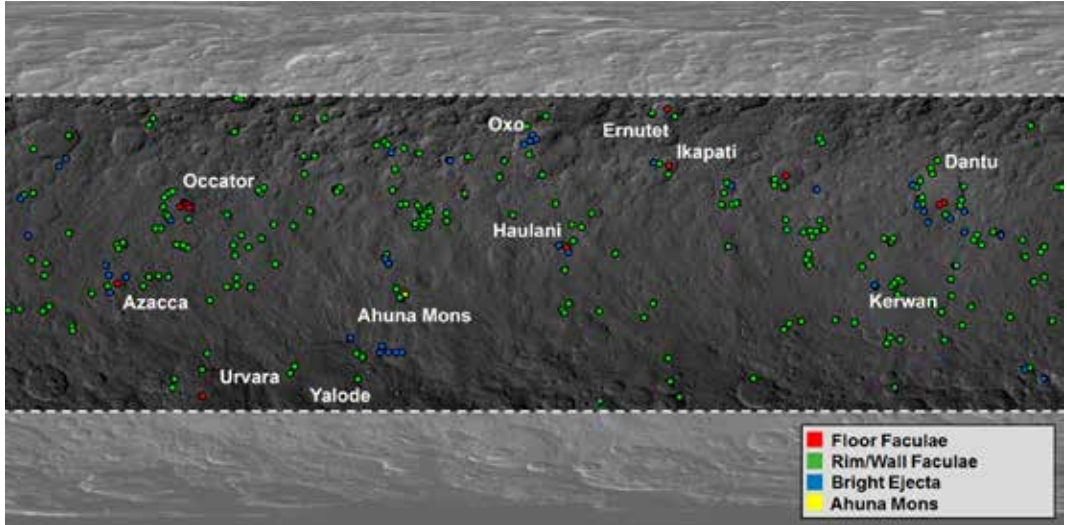
La seconde catégorie, plus commune, se trouve sur les flancs des cratères et consiste en traînées de matière blanche dirigées vers le plancher. Les impacts qui ont formé les cratères ont dû exposer des matériaux brillants présents sous la surface ou formés lors d'un impact précédent.

Le troisième type comprend les dépôts d'éjectas expulsés dans les impacts.

La dernière catégorie est dédiée uniquement à la montagne Ahuna Mons. C'est le seul exemple de matière brillante qui ne soit pas associée à des cratères. On pense qu'il s'agit là d'un cryovolcan formé par l'écoulement graduel de glaces. On peut voir sur ses flancs des traînées brillantes.

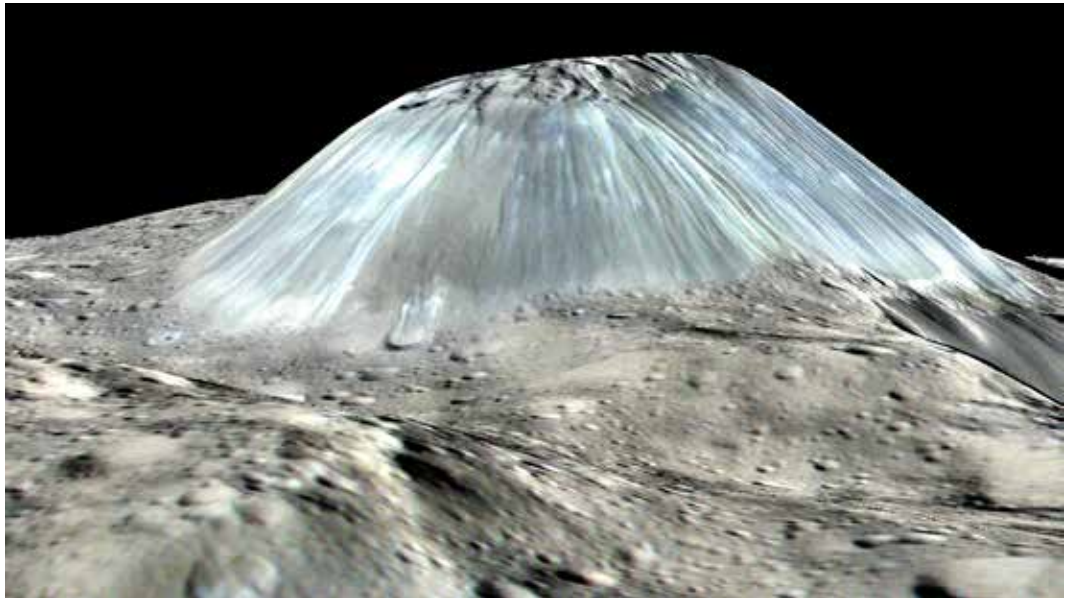
Perspective simulée d'une image du cratère Occator avec les zones brillantes Cerealia Facula au centre et Vinalia Faculae à droite. (NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA/PSI)





Emplacement des taches brillantes (faculae) de Cérés. (NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA/PSI/Caltech)

Ahuna Mons, la seule montagne importante de Cérés, est recouverte de matériaux blancs ne provenant pas d'un impact (vue en perspective simulée). (NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA)





Le cratère Haulani de 34 kilomètres de diamètre montre des glissements de matériaux depuis ses murs. (NASA/JPL-Caltech/UCLA/MPS/DLR/IDA)

Au cours des âges, les matières brillantes et sombres se sont mélangées à la surface de Cérès et il est probable que lorsque Cérès était soumis à un bombardement plus intense – il y a des milliards d’années – sa surface était constellée de milliers de taches brillantes.

Le cas d’Occator est particulier. On pense que son sous-sol a pu contenir une poche d’eau salée. Les taches de Vinalia Faculae proviendraient de ce fluide poussé vers la surface au travers de fractures. Le gaz a pu être de l’eau, du dioxyde de carbone, ou de l’ammoniac, rapidement vaporisé sous la très faible pression atmosphérique et emmenant avec lui de la glace et des particules de sel.

Cerealia Facula est plus élevée et plus brillante que Vinalia Faculae. Les matériaux souterrains ont dû émerger comme de la lave en formant un dôme. Le processus a été accompagné de vaporisation, comme dans le cas de Vinalia Faculae, dispersant les glaces et les sels sur le sol.

Les fractures qui ont permis les remontées de fluide ont pu être créées par l’impact qui a laissé ce cratère de plus de 90 kilomètres de diamètre.

Voyager 1

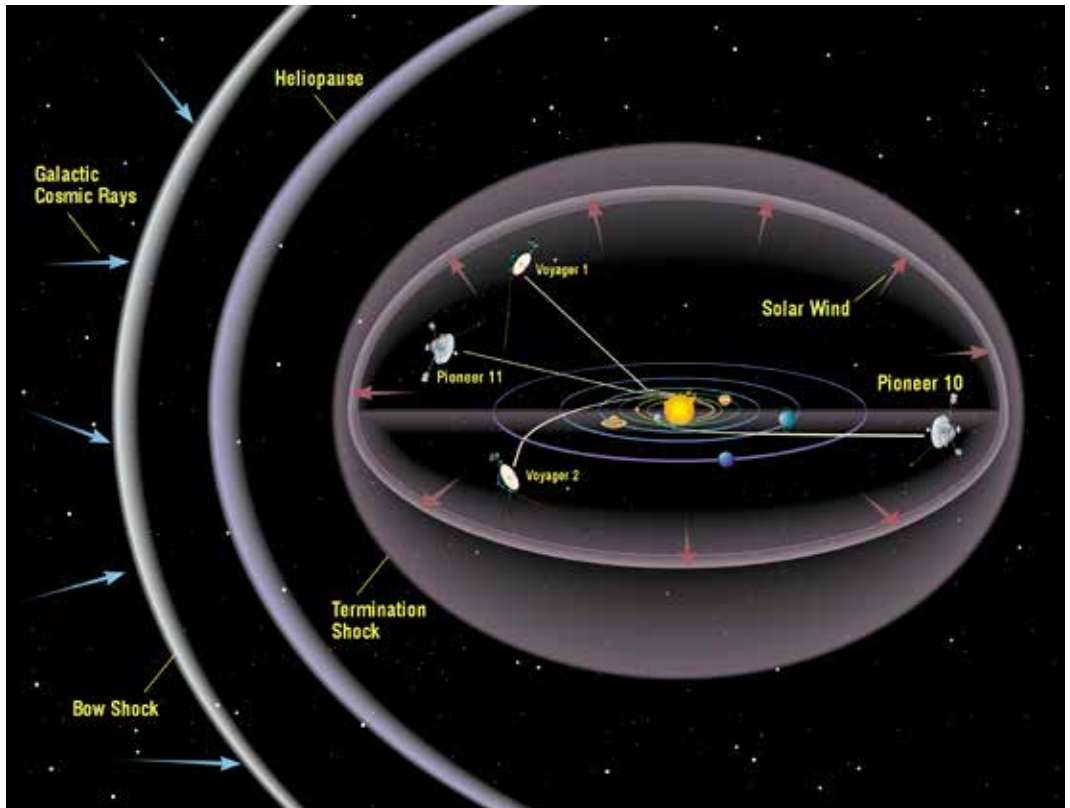
La vénérable sonde de la NASA Voyager 1 a mis en marche quatre moteurs qui n'avaient pas été utilisés en 37 ans. Ces propulseurs TCM (Trajectory Course Maneuvering) étaient destinés à contrôler l'engin pointé vers les planètes et les lunes au début de son périple et, une fois leur mission accomplie, ils prenaient un repos bien mérité et, en principe, définitif.

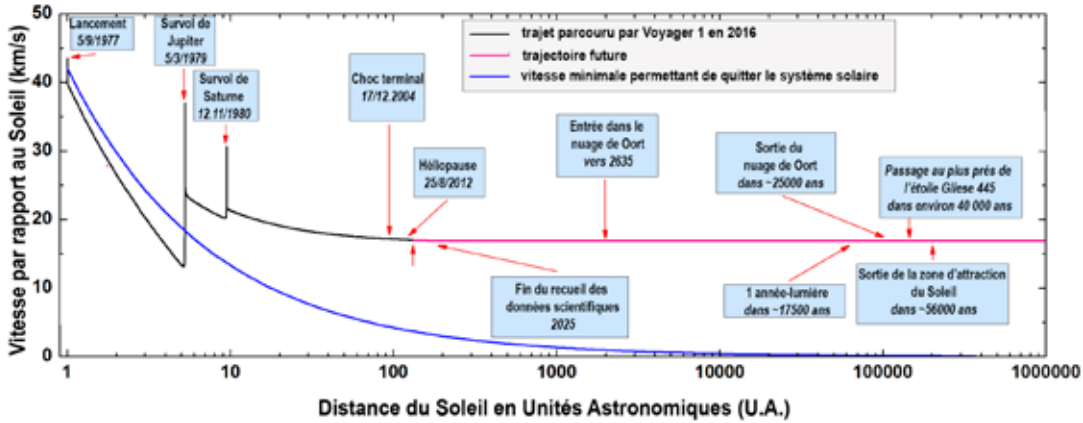
Lancée en septembre 1977 Voyager 1 a survolé le système de Jupiter en mars 1979 et celui de Saturne en novembre 1980 puis s'est écartée du plan de l'écliptique en direction d'Ophiuchus après un dernier allumage des moteurs TCM le 8 novembre pour survoler Titan. La sonde jumelle Voyager 2 a également visité Jupiter et Saturne mais elle est restée

sagement dans l'écliptique pour continuer vers Uranus et Neptune.

Les moteurs principaux de contrôle d'attitude de Voyager 1 – d'une centaine de grammes seulement – doivent assurer que l'antenne de 3 m 70 reste pointée vers la Terre. Les ingénieurs ont remarqué ces dernières années qu'il fallait les allumer de plus en plus souvent, signe que leur performance se dégradait. Il s'agissait déjà de moteurs de backup. Pour les remplacer par les propulseurs TCM il fallait s'assurer que ceux-ci pouvaient fournir des poussées très brèves, d'un centième de seconde alors que dans leur

Structure de la zone de l'espace influencée par le Soleil. L'illustration date de 1997. Voyager 1 a maintenant traversé l'héliopause. (NASA)



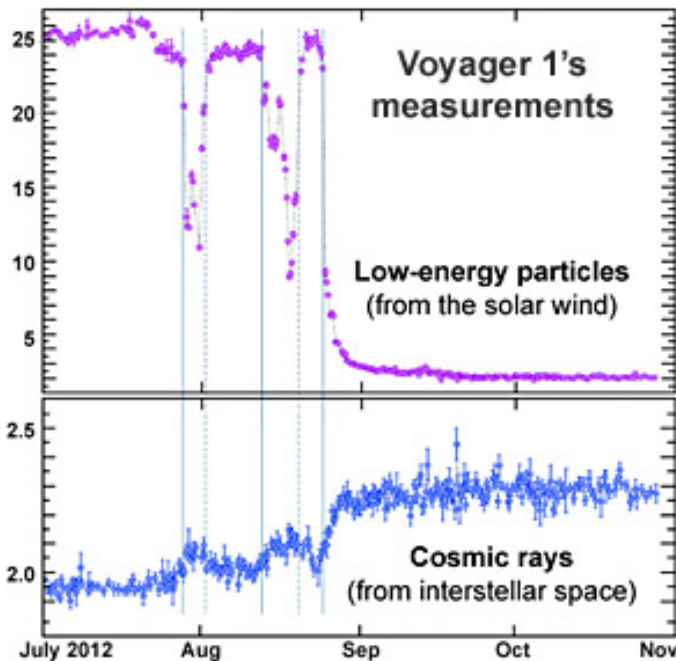


fonctionnement normal, en 1980, ils donnaient une poussée plus continue.

Après avoir décodé l'antique software écrit en assembleur les ingénieurs ont effectué le 28 novembre un test qui s'est révélé un succès. Les moteurs TCM devraient ainsi prendre le relais pendant quelques années. Leur fonctionnement demande un apport de chaleur

Trajectoire de la sonde spatiale Voyager 1 : vitesse et distance du Soleil. On voit les coups de pouce gravitationnels fournis par Jupiter et Saturne. (Wikipedia)

assuré par le générateur au plutonium-238. Ce radioélément a une demi-vie de 88 ans et son rendement est déjà bien

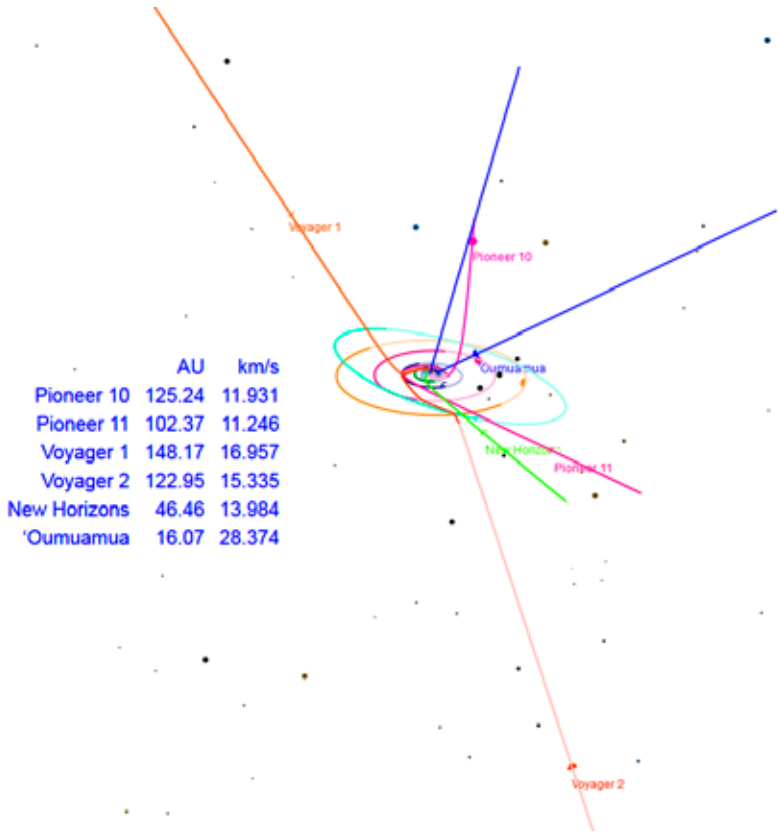


entamé. L'utilisation des TCM ne pourra durer que quelques années. Après cela il faudra revenir aux moteurs défaillants en espérant qu'ils tiennent le plus longtemps possible.

Voyager 2 devrait faire l'objet des mêmes procédures afin de se prémunir également contre une dégradation des fusées de contrôle.

Voyager 1 a franchi en août 2012 la frontière entre la zone d'influence du Soleil et l'espace interstellaire. Le nombre de particules de basse énergie provenant du vent

Franchissement de l'héliopause par Voyager 1 en 2012. (NASA/JPL/GSFC)



solaire a chuté brusquement alors que les rayons cosmiques arrivaient plus nombreux de l'espace interstellaire. Voyager 2 traversera la même frontière dans quelques années. Les sondes encore plus anciennes, mais moins rapides, Pioneer 10 et 11¹ se dirigent elles aussi vers l'espace interstellaire, mais elles sont muettes depuis 2003 et 1995.

Position et vitesse des six objets en route vers l'espace intersidéral à la date du 31 janvier 2020. (Tony Dunn gravity simulator <http://www.orbitsimulator.com>)

Deux autres objets se dirigent aussi vers l'espace intersidéral. D'une part la sonde New Horizons qui n'a pas encore fini ses investigations dans la ceinture de Kuiper. D'autre part l'objet 11/2017 U1 'Oumuamua qui est en train de faire une brève incursion dans le Système solaire et repart aussi vite qu'il était venu. C'est d'ailleurs le plus rapide des six.

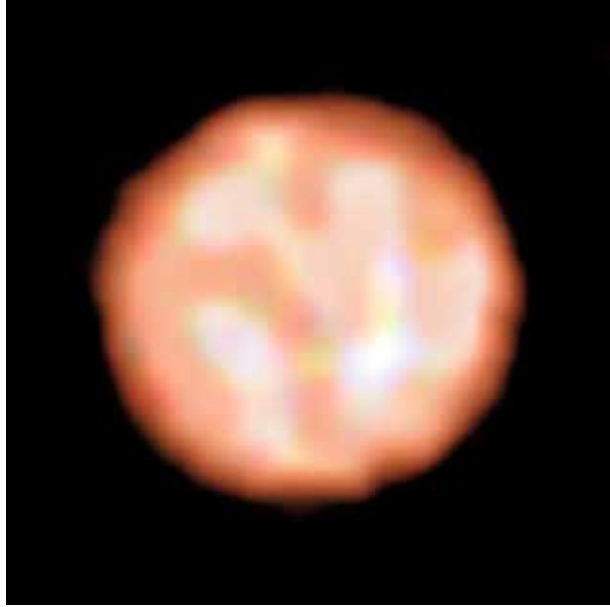
¹ Les vitesses des sondes étaient de 2,5 unités astronomiques par an pour Pioneer 10 en 2002, de 2,4 ua/an pour Pioneer 11 en 1995, et de 3,6 et 3,2 ua/an pour les Voyager 1 et 2 en 2017.

π^1 Gruis

Basé sur un communiqué ESO

Distante de quelque 530 années-lumière de la Terre et située dans la constellation de la Grue, π^1 Gruis¹ est une géante rouge de masse comparable à celle du Soleil. C'est l'un des membres les plus brillants de la petite classe S d'étoiles définie pour la première fois par l'astronome américain Paul W. Merrill et qui rassemble des étoiles dotées de spectres inhabituels. π^1 Gruis, R Andromedae et R Cygni sont caractéristiques de ce type d'étoiles. Leur spectre inhabituel résulte du processus « s » – un lent processus de capture de neutrons – responsable de la création de la moitié des éléments plus lourds que le fer. Le diamètre de π^1 Gruis vaut 350 fois celui de notre étoile et sa brillance surpasse le sien de milliers de fois. Dans quelque cinq milliards d'années, le Soleil traversera aussi une phase de géante rouge.

Les astronomes ont utilisé l'instrument PIONIER installé sur le Very Large Telescope de l'ESO pour observer π^1 Gruis à un niveau de détail encore inégalé. La photosphère de nombreuses géantes rouges est obscurcie par



La surface de la géante rouge π^1 Gruis imagée par l'instrument PIONIER sur le VLT.

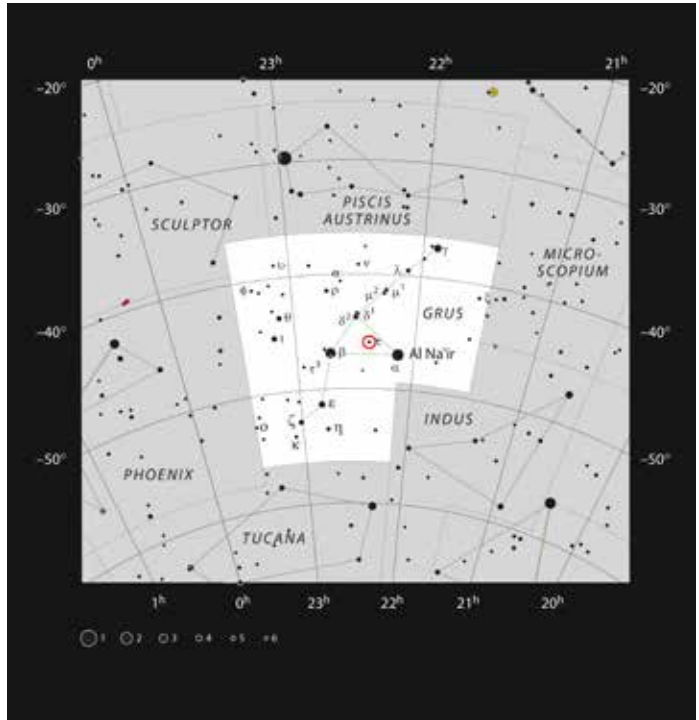
des poussières, ce qui brouille les observations, mais ce n'est heureusement pas important pour les observations en infrarouge de π^1 Gruis. Il est ainsi apparu que la surface de cette géante rouge était couverte d'un nombre restreint de cellules convectives, ou granules, qui s'étendent sur 120 millions de kilomètres – ce qui représente le quart du diamètre stellaire. Un seul de ces granules couvrirait la surface comprise entre le Soleil et l'orbite de la planète Vénus.²

¹ L'appellation de π^1 Gruis s'inscrit dans le cadre du système de désignation de Johann Bayer datant de 1603. L'astronome allemand classifia 1564 étoiles, attribuant à chacune d'elles une lettre grecque suivie du nom de la constellation hôte. Généralement, l'attribution des lettres grecques s'effectua par classe de grandeur et, dans chaque classe par la position (le long d'un contour par exemple). Bayer n'ayant pas attribué de lettres grecques aux étoiles de la Grue, c'est Nicolas Louis de Lacaille qui s'en est chargé pour quelques-unes d'entre elles, dont π , en 1758.

L'indice 1 indique que π^1 Gruis appartient à un système multiple, une double aux couleurs contrastées, le compagnon portant naturellement la désignation π^2 Gruis. L'une et l'autre étoiles sont suffisamment brillantes pour pouvoir être observées au travers de jumelles. En 1830, Thomas Brisbane comprit que π^1 Gruis consistait également en un système binaire encore plus serré. Annie Jump Cannon, célèbre pour la création de la classification de Harvard, fut la première à rendre compte du spectre inhabituel de π^1 Gruis en 1895.

² Les granules sont caractéristiques des courants de convection qui animent le plasma d'une étoile. Au fur et à mesure que le plasma s'échauffe au cœur de l'étoile, il s'étend et chemine vers la surface, puis se refroidit en périphérie, s'assombrissant et gagnant en densité, et enfin plonge vers le centre de l'étoile. Ce phénomène se poursuit pendant des milliards d'années et joue un rôle essentiel dans de nombreux processus astrophysiques tels le transport d'énergie, la pulsation, le vent stellaire et les nuages de poussière sur les naines brunes.

Carte de la constellation australe de la Grue montrant la plupart des étoiles visibles à l'œil nu. La double π Gruis est entourée d'un cercle rouge. (ESO, IAU and Sky & Telescope)



Lorsque l'hydrogène vint à manquer au cœur de π^1 Gruis, le premier stade de fusion nucléaire prit fin. Le volume de l'étoile diminua à mesure qu'elle perdait de l'énergie, et sa température interne augmenta progressivement jusqu'à dépasser les 100 millions de degrés. S'en suivit l'enclenchement de la seconde étape de fusion nucléaire qui transforme l'hélium en atomes plus lourds de carbone et d'oxygène. Puis, le noyau très chaud expulsa les enveloppes externes de l'étoile, ce qui se traduisit par l'augmentation de sa taille de plusieurs centaines de fois. L'étoile que nous observons à présent est une géante rouge variable.

À titre de comparaison, la photosphère du Soleil se compose de deux millions de cellules convectives dont les diamètres avoisinent les 1 500 kilomètres. L'énorme différence de taille des cellules convectives couvrant les surfaces de l'une et l'autre étoile s'explique en partie par leur gravité. La masse de π^1 Gruis équivaut à 1,5 masse solaire, mais ses dimensions sont bien supérieures, ce qui se traduit par une gravité de surface nettement moindre et la présence d'un nombre plus faible de granules de grande dimension.

Les étoiles de masse supérieure à huit masses solaires achèvent leurs existences en explosant en supernova. A l'inverse, les étoiles moins massives telle π^1 Gruis expulsent progressivement leurs enveloppes externes, donnant lieu à la formation de splendides nébuleuses planétaires. Les études antérieures de π^1 Gruis ont mis en évidence l'existence d'une enveloppe de matière à 0,9 année-lumière de l'étoile centrale, dont l'éjection remonterait à 20 000 ans. Cette période relativement courte à l'échelle de vie d'une étoile – plusieurs milliards d'années – s'étend sur quelques dizaines de milliers d'années seulement. Ces observations offrent une nouvelle méthode de détection de cette courte phase de géante rouge.

Un curieux filament

En 2016 le réseau de radiotélescopes VLA (Karl G. Jansky Very Large Array) avait permis d'identifier un curieux filament dans la direction du centre de la Voie lactée et semblant s'incurver sous l'influence du trou noir supermassif Sagittarius A*. S'il est situé à la même distance, on peut lui attribuer une longueur de 2,3 années-lumière. De nouvelles images ont permis de tracer ce filament jusqu'au plus près du centre et de formuler l'hypothèse qu'il devait y trouver son origine.

Il pourrait s'agir de particules émises à très haute vitesse par le trou noir et produisant une émission radio en tournant autour des lignes de force de son champ magnétique. Une autre hypothèse, plutôt fantastique, envisage une « corde » cosmique¹, un objet théorique jamais encore observé, très long et très fin, muni de masse. Les théoriciens pensent que si ces cordes existent, elles doivent être attirées au centre des galaxies pour être finalement capturées par le trou noir dès qu'une portion en franchit l'« horizon des événements ».

Une troisième hypothèse beaucoup plus prosaïque est que l'on a affaire à une simple coïncidence. Un filament comme on en connaît des dizaines se trouverait par hasard sur la ligne de visée. La probabilité

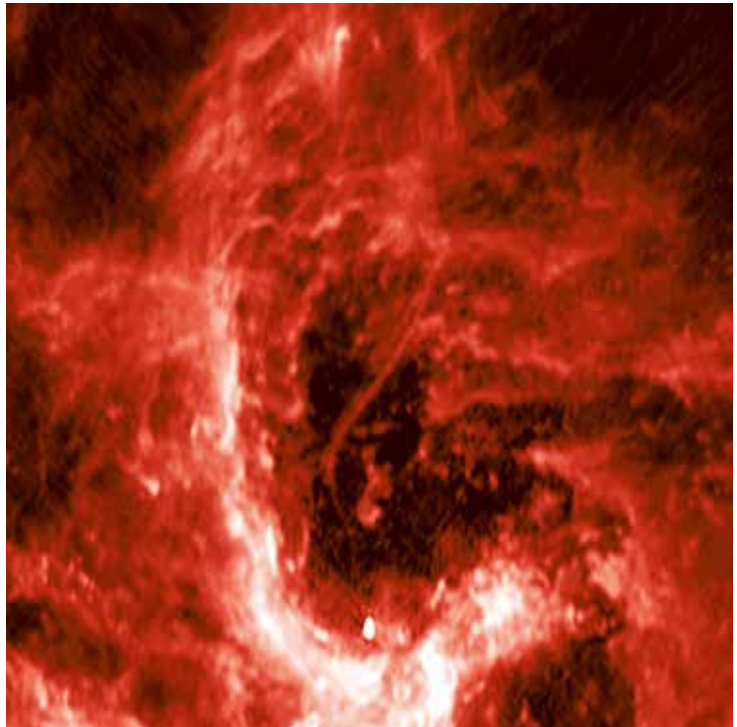
¹ Il ne faut pas confondre ces cordes cosmiques avec celles, microscopiques, de la théorie des cordes.

Le mince ruban au centre de cette image radio prise par le VLA semble émaner du centre de la Galaxie (Sgr A, en bas de l'image). (NSF/VLA/UCLA/ M. Morris et al.)*

d'une telle coïncidence est toutefois très faible. La courbure du filament serait alors due à une onde de choc ou à des vents puissants qui pourraient provenir d'étoiles massives entourant le trou noir.

S'il s'agit bien d'un jet de particules, ce filament pourrait nous apprendre beaucoup sur le champ magnétique en nous montrant qu'il est ordonné plutôt que chaotique. Des observations devraient montrer que les particules perdent de l'énergie en s'éloignant de la source.

L'hypothèse de la corde cosmique serait quant à elle la preuve d'une théorie très spéculative et aurait de grandes répercussions sur notre compréhension de la gravité et de l'espace-temps. Une corde cosmique devrait se déplacer à des vitesses relativistes de sorte que des observations ultérieures avec le VLA devraient montrer son mouvement.



Matière noire

Une nouvelle interprétation des données X de l'amas de galaxies de Persée pourrait permettre aux scientifiques de découvrir enfin la nature de la matière noire qui composerait 85% de la matière de l'Univers. Cette interprétation vient des résultats des télescopes spatiaux X Chandra de la NASA, XMM-Newton de l'ESA et Hitomi de l'agence japonaise JAXA.

L'histoire débute en 2004 avec la découverte par Chandra et XMM d'un pic d'intensité à l'énergie de 3,5 keV dans le spectre du gaz chaud de l'amas. Cette émission est quasiment impossible à expliquer de façon classique ce qui a conduit les astronomes à faire appel à la matière noire. L'étude par XMM-Newton de 73 autres amas de galaxies montrait le même pic d'énergie tandis que d'autres observations XMM-Newton le découvraient dans la galaxie M31 et à la périphérie de l'amas de Persée. Toutefois, alors que de nouvelles observations mettaient en évidence l'émission à 3,5 keV de nouveaux objets, d'autres mesures commençaient à ne pas la déceler. Et, un comble, en 2016 le nouvel observatoire spatial Hitomi¹, dédié à l'étude détaillée d'émissions de ce genre, ne décelait pas ce pic dans l'amas de Persée. Cela pouvait sembler mettre un terme

à la discussion. Cette prétendue émission n'était qu'un artefact.

C'était aller trop vite en besogne. Hitomi donne des images beaucoup moins fines que Chandra et ses données concernant l'amas de Persée ne permettent pas de séparer les différentes régions. Au contraire, Chandra peut distinguer par exemple la composante diffuse de gaz chaud entourant la galaxie géante située au cœur de l'amas et l'émission X provenant du trou noir supermassif de cette galaxie. En regardant de plus près les astronomes s'aperçurent que le gaz près du trou noir donnait un déficit d'énergie à 3,5 keV – une absorption plutôt qu'une émission. En combinant les deux composantes l'absorption compense l'émission, ce qui explique la non détection par Hitomi.

Ce phénomène est bien connu des astronomes. On voit les raies d'absorption d'un nuage dans le spectre d'un objet situé derrière lui. Par contre, si l'on regarde à côté de l'objet on verra le spectre en émission, ré-émis par fluorescence.

Si cela se confirme, on aurait bien affaire à des particules de matière noire disposant de deux niveaux d'énergie séparés de 3,5 keV.

¹ Voir G. Rauw, *Le Ciel*, 78 (2016), 418

L'amas de galaxies de Persée. Image composée à partir de données X de Chandra (en bleu), optiques de Hubble (en rose) et radio du VLA (en rouge). (NASA/CXO/Fabian et al. ; Gendron-Marsolais et al. ; NRAO/AUI/NSF ; SDSS)



Nébuleuses ELAN

L'instrument MUSE (Multi Unit Spectroscopic Explorer)¹ du télescope VLT de l'ESO à l'observatoire Paranal a photographié un énorme nuage de gaz autour du lointain quasar 4C 10.29 = SDSS J102009.99+104002.7. Un quasar est le noyau d'une galaxie active, c'est-à-dire la région entourant le trou noir supermassif central. L'activité est due à la chute de la matière

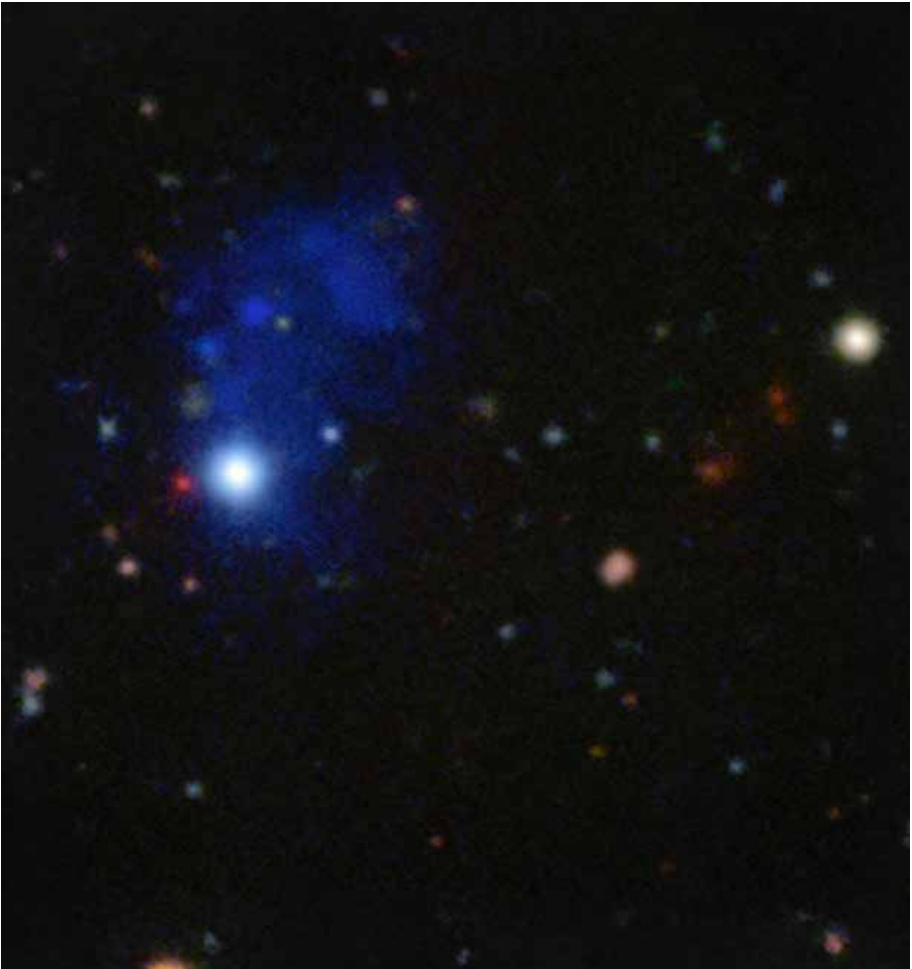
environnante sur le trou noir, ou plutôt sur son disque d'accrétion.

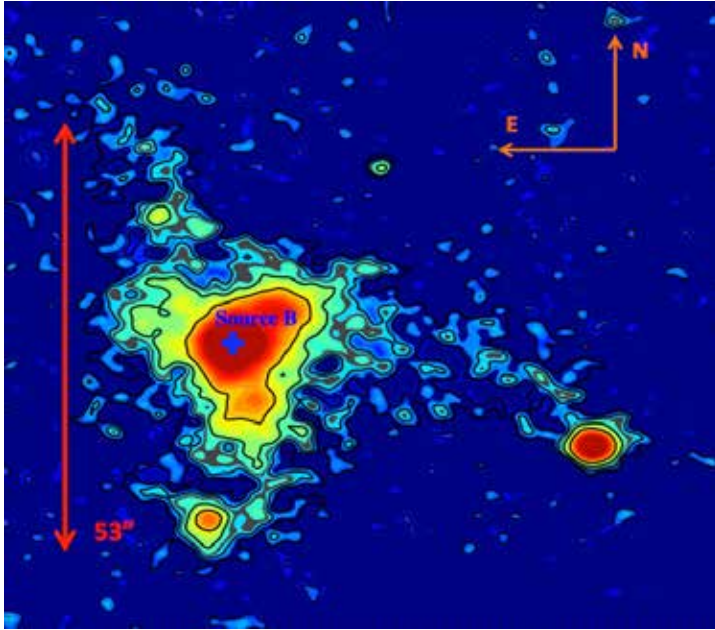
Le quasar SDSS J102009.99+104002.7 et le gigantesque nuage qui l'enrobe se trouvent à un redshift de 3, ce qui signifie qu'on les voit comme ils étaient deux milliards d'années après le Big Bang.

La nébuleuse qui entoure le quasar est ce que les astronomes appellent une nébuleuse

***Nébuleuse ELAN et quasar SDSS
J102009.99 +104002.7.
(ESO/Arrigoni Battaia et al.)***

¹ Voir *Le Ciel*, 80 (2018, 38)





L'ELAN MAMMOTH-1 est probablement alimentée par le rayonnement d'un quasar que les nuages de poussière nous empêchent de voir. (Zheng Cai et al., 2016)

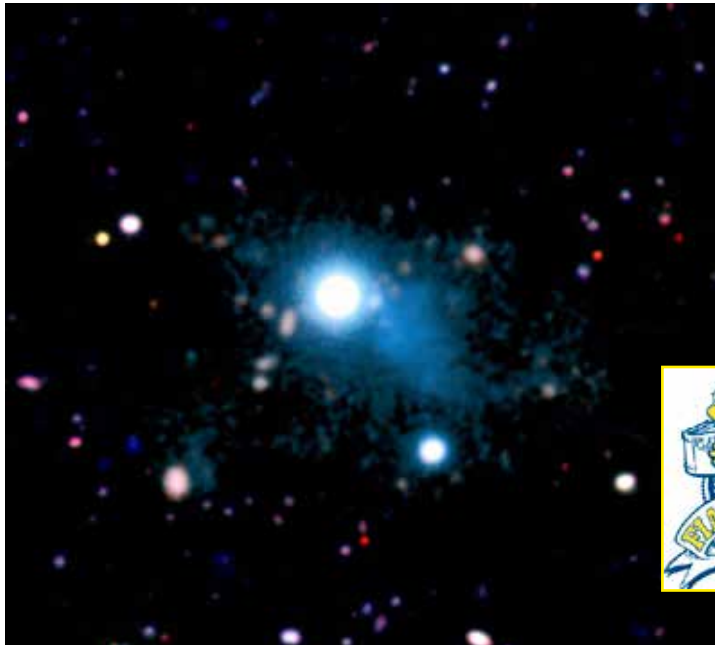
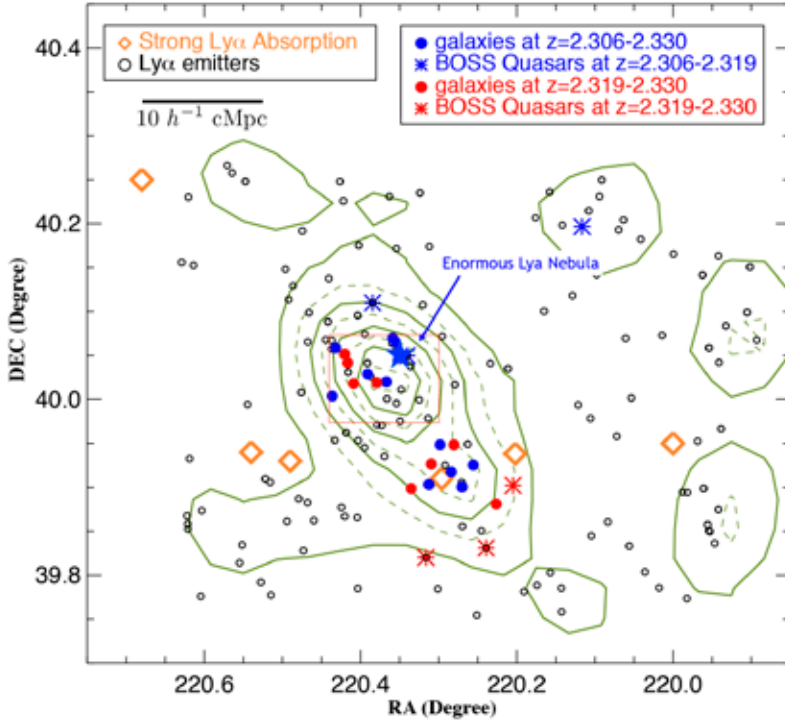


Image Keck de la nébuleuse de la Limace (Slug). Celle-ci s'étend sur deux millions d'années-lumière autour du quasar brillant UM287. (S. Cantalupo, UCSC)



La mascotte de l'UCSC.



La densité en galaxies permet de dessiner le proto-amas Boss 1441. Au centre l'énorme nébuleuse Lyman-alpha MAMMOTH-1. (Zheng Cai et al., 2016)

« ELAN ». Cette désignation ne fait pas référence au grand cervidé, mais est l'acronyme de « Enormous Lyman-Alpha Nebula ». Les nébuleuses de ce type sont des nuages massifs qui se sont formés dans l'Univers primordial. Grâce à MUSE, il est maintenant possible d'observer ces nébuleuses à un niveau de détail jamais atteint. Les ELAN peuvent entourer des galaxies ou les relier entre elles. On pense qu'elles font partie du réseau d'interconnexions de la toile cosmique. L'énergie des ELAN provient probablement de quasars, mais peut-être aussi de supernovæ ou d'une activité de formation stellaire.

La nébuleuse ELAN entourant 4C 10.29 a un diamètre d'environ 1 million d'années-lumière. Les capacités spectroscopiques de MUSE ont permis aux astronomes de mesurer pour la première fois les mouvements en spirale à l'intérieur de la nébuleuse.

Les ELAN connues à ce jour sont peu nombreuses et parfois affublées de noms curieux. MAMMOTH-1 doit le sien au projet « Mapping the Most Massive Overdensities Through Hydrogen » qui recherche les proto-amas de galaxies dans l'Univers jeune en examinant le spectre de quasars. MAMMOTH-1 se trouve au centre du proto-amas BOSS1441 de 50 millions d'années-lumière de diamètre.

La première ELAN, la nébuleuse de la Limace découverte en 2014, est quant à elle nommée en l'honneur de la très populaire mascotte de l'université de Californie à Santa Cruz.

Voyage au centre d'une étoile naine blanche

Basé sur un communiqué CNRS-INSU

C'est en exploitant les données du satellite Kepler de la NASA sur les pulsations de l'étoile KIC 08626021 que l'on a pu dresser la cartographie de la composition interne d'une naine blanche, successeur lointain d'une étoile semblable à notre Soleil. Les oscillations de luminosité observées à la surface de cette étoile ont été déchiffrées au moyen des techniques d'astérosismologie, analogues aux méthodes qu'emploient les géophysiciens pour étudier la structure de notre planète grâce aux ondes sismiques provoquées par les tremblements de Terre.

Les naines blanches sont les cœurs reliques de 97% des étoiles de l'Univers. Ces véritables fossiles stellaires conservent précieusement l'empreinte des processus physiques passés, tels que la fusion nucléaire et les épisodes de mélange convectif, phénomènes toujours très incertains dans les modélisations actuelles des théories d'évolution stellaire.

Les tremblements d'étoile génèrent des vibrations se propageant parfois jusqu'au cœur de l'astre, comme ici pour la naine blanche KIC 08626021.
(Stéphane Charpinet)

Obtenir une vue claire de la composition de ces étoiles permettra de mieux déchiffrer les phénomènes en jeu lors des phases antérieures de leur évolution.

Au cours de leur lent refroidissement ces étoiles passent par des phases d'instabilité où elles se mettent à vibrer. Ces profonds tremblements d'étoile sont la clé permettant de lever le voile sur leur intérieur même. La stratification chimique interne de la naine blanche génère en effet une signature unique sur les modulations lumineuses émergeant de l'étoile qui, une fois déchiffrée, permet d'en cartographier la structure.

Et que dévoile-t-on au plus profond de ces étoiles? Non seulement un cœur nettement plus grand et plus riche en oxygène que prédit, mais également le profil de distribution des principaux éléments chimiques présents. Cette découverte offre ainsi un banc d'essai pour calibrer finement les processus physiques de fusion nucléaire et de mélange convectif à l'œuvre dans la plupart des étoiles, en particulier durant les phases d'évolution stellaire pré-naine blanche. Une connaissance précise de la composition chimique interne des naines blanches est également précieuse pour les utiliser comme « chronomètres cosmiques » destinés à la datation des populations stellaires constituant notre Galaxie.

