

L'astronomie dans le monde

Le proto-amas de galaxies SPT2349-56

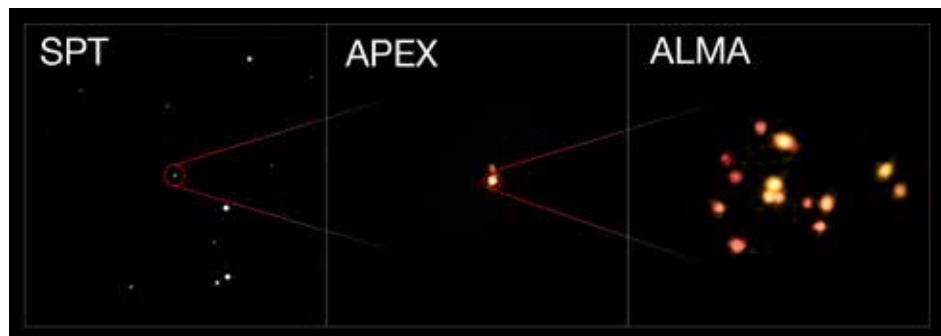
Basé sur un communiqué ESO

Les antennes ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) et APEX (Atacama Pathfinder Experiment) ont sondé l'Univers lointain – cette époque à laquelle l'Univers n'était âgé que du dixième de son âge actuel – et assisté aux tout débuts de gigantesques carambolages cosmiques : les collisions imminentes de galaxies à formation d'étoiles. Les astronomes pensaient que ces événements s'étaient produits quelque trois milliards d'années après le Big Bang. Ils ont donc été surpris de constater, au travers de ces nouvelles observations, que ces collisions sont en réalité survenues alors que l'Univers était deux fois plus jeune. Ces anciens systèmes de galaxies sont supposés avoir contribué à la formation des structures les plus massives de l'Univers connu, les amas de galaxies.

Parmi ces noyaux de futurs amas colossaux, ALMA et APEX ont observé le proto-amas de galaxies SPT2349-56 tel qu'il était lorsque l'Univers n'avait que le dixième de son âge actuel.

Chacune des galaxies composant ce conglomérat cosmique est une galaxie à for-

Sur cette image composite figurent trois vues d'un lointain ensemble de galaxies interagissant et fusionnant les unes avec les autres au sein de l'Univers jeune. L'image latérale gauche consiste en une vue à grand champ acquise par le South Pole Telescope. Elle montre un simple point brillant. L'image centrale, obtenue par l'Atacama Pathfinder Experiment (APEX), révèle davantage de détails. Enfin, l'image latérale droite issue de l'Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) met en évidence 14 galaxies sur le point de fusionner et de former un amas. (ESO/ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/Miller et al.)



mation d'étoiles. L'extrême concentration de ces zones en fait les régions les plus actives observées à ce jour dans l'Univers jeune. Des milliers d'étoiles y naissent chaque année, contre une seule dans la Voie lactée.

Cette découverte fait suite à celle d'un processus similaire de mégafusion de dix galaxies poussiéreuses à formation d'étoiles grâce aux observations d'ALMA et d'APEX. Cet agglomérat a été surnommé « noyau rouge poussiéreux » en raison de sa couleur prononcée.

On pense que la durée de vie des sursauts stellaires poussiéreux est relativement courte, parce qu'ils consomment leur gaz à une vitesse extraordinairement élevée. À tout instant, et en tout point de l'Univers, ces galaxies sont généralement minoritaires. Découvrir de nombreux sursauts stellaires poussiéreux brillant au même instant s'avère donc particulièrement déroutant.

Ces amas de galaxies en cours de formation ont tout d'abord été décelés comme de faibles taches lumineuses dans les données du South Pole Telescope et de l'Observatoire Spatial Herschel. Les observations ultérieures effectuées au moyen d'ALMA et d'APEX ont montré qu'ils présentaient une structure pour le moins inhabituelle et confirmé qu'ils émettaient de la lumière depuis une époque reculée, 1,5 milliard d'années après le Big Bang.

Dotées d'une résolution élevée, les nouvelles observations d'ALMA ont révélé qu'il ne s'agit pas d'objets isolés, mais de deux groupes composés respectivement de quatorze et dix galaxies massives et dont les rayons sont comparables à la distance séparant la Voie lactée de ses voisins les Nuages de Magellan.

Ces découvertes ne sont que le sommet de l'iceberg. Des observations complémentaires effectuées au moyen du télescope APEX montrent que le nombre réel de galaxies à formation d'étoiles est vraisemblablement trois fois plus élevé. Une autre campagne d'observations actuellement menée avec l'instrument MUSE installé sur le VLT de l'ESO conduit également à l'identification d'autres galaxies.

Les modèles théoriques et informatiques actuels laissent à penser que le temps néces-

saire à l'évolution de proto-amas aussi massifs est plus long que ne le suggèrent les observations. En insérant les données d'ALMA, dotées d'une résolution et d'une sensibilité supérieures, dans les simulations informatiques sophistiquées, les chercheurs peuvent étudier la formation des amas moins d'1,5 milliard d'années après le Big Bang.

Le processus responsable de l'agrégation si rapide d'un si grand nombre de galaxies demeure un mystère. Cet amas ne s'est pas construit graduellement au fil des milliards d'années, contrairement à ce que pensaient les astronomes. Cette découverte offre la formidable opportunité d'étudier la façon dont les galaxies massives se sont rassemblées pour former de gigantesques amas galactiques.

Étoiles à neutrons et trous noirs

Le 17 août 2017 les astronomes ont détecté les ondes gravitationnelles et électromagnétiques – celles-ci sous la forme de rayonnement gamma – émises lors de la collision et de la fusion de deux étoiles à neutrons (GW170817). Les observations subséquentes effectuées avec le télescope spatial X Chandra incitaient à penser que cette fusion avait créé un trou noir. Sa masse, déterminée grâce aux ondes gravitationnelles détectées par LIGO, s'établissait à 2,7 fois celle du Soleil, ce qui en faisait le trou noir le plus léger connu. Les moins massifs des trous noirs pesaient de quatre à cinq soleils.

Si l'objet créé avait été une étoile à neutrons massive, elle aurait dû tourner très rapidement sur elle-même et posséder un champ magnétique intense. Cela aurait produit l'expansion d'un nuage de débris de haute énergie et des émissions X des centaines de fois plus importantes que celles détectées avec Chandra. La comparaison des observations X à celles faites en radio au VLA (Karl Jansky Very Large Array) montre que les rayons X proviennent bien de la propagation d'une onde de choc dans le milieu environnant et non d'une étoile à neutrons.

Une conclusion définitive viendra d'observations subséquentes. S'il s'agit d'un trou

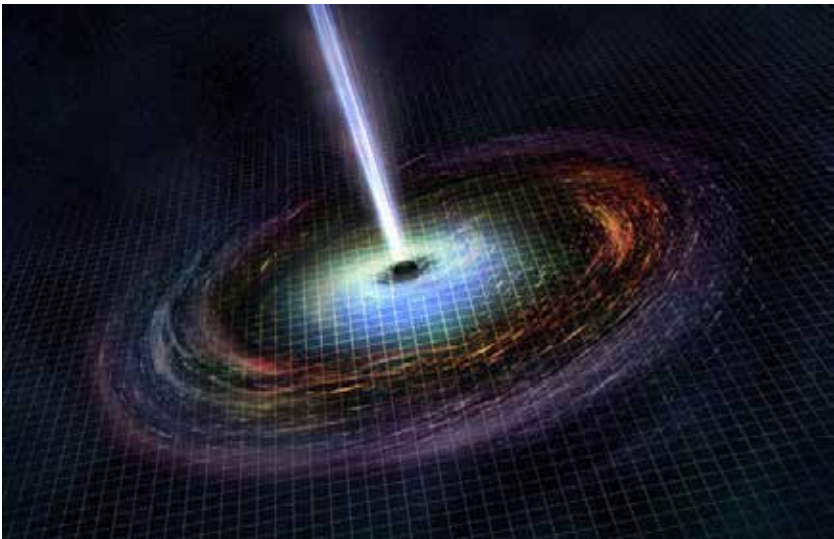
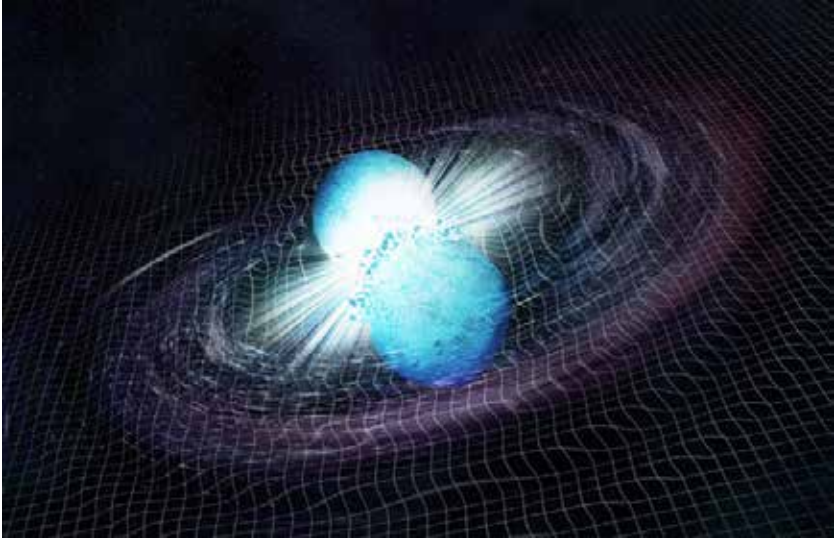


Illustration de la collision de deux étoiles à neutrons (en haut) et du trou noir résultant (en bas) orné d'un jet et d'un disque de débris. (NASA/CXC/M. Weiss)

noir, le signal de GW170817 continuera de faiblir en même temps que l'onde de choc. Par contre, une étoile à neutrons disposant d'un puissant champ magnétique devrait augmenter d'intensité lorsque les particules émises rattraperont l'onde de choc.

M31

Notre voisine M31, la galaxie d'Andromède, aurait détruit et cannibalisé une galaxie massive il y a deux milliards d'années, un scénario qui rappelle celui que nous décrivions dans le bulletin de mai (*Le Ciel*, 80, 2018, p. 272).

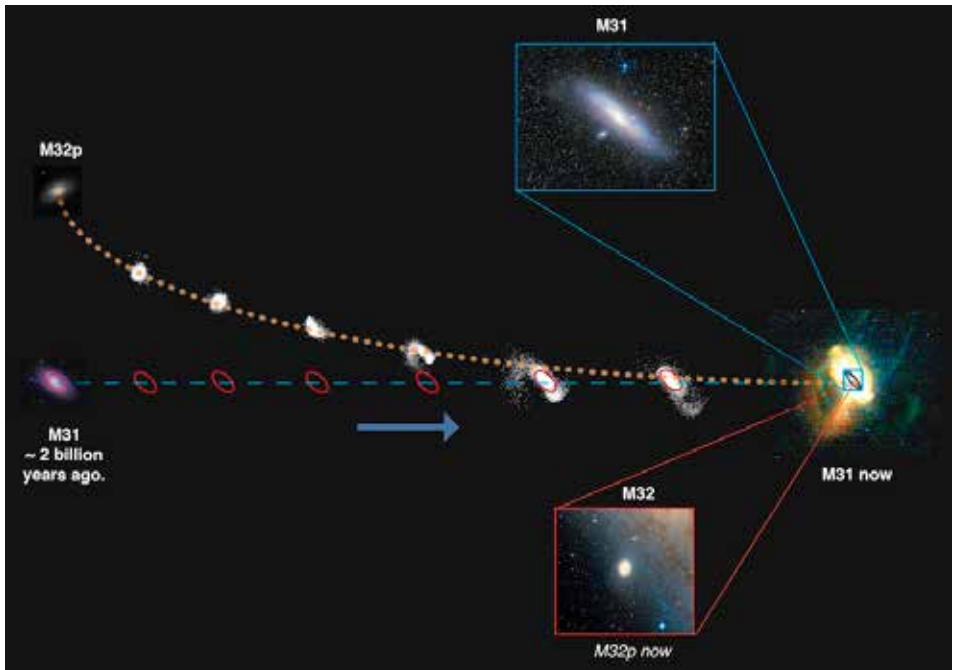
Cette galaxie laisse de nombreuses traces : un halo d'étoiles plus grand que M31, un courant d'étoiles et l'énigmatique galaxie compacte M32. L'étude de ces restes devrait aider à comprendre comment les galaxies-disques comme la Voie lactée évoluent et survivent aux collisions. Ainsi il faut sans doute revoir la conception selon laquelle des interactions aussi violentes devraient détruire les disques et produire des galaxies elliptiques. Cette collision explique aussi l'épaississement du disque d'Andromède et le sursaut d'activité de formation stellaire il y a deux milliards d'années, une conclusion déjà tirée dans l'étude citée ci-dessus.

On sait depuis longtemps que les halos presque invisibles qui entourent les grandes galaxies contiennent les résidus de nombreuses petites galaxies, des centaines dans le cas d'Andromède. Il semblait donc illusoire d'espérer pouvoir analyser individuellement l'une de ces fusions.

Des simulations par ordinateur ont permis de comprendre que la plupart des étoiles du halo externe d'Andromède proviennent d'une seule galaxie très massive. Dénommée M32p, celle-ci était plus de 20 fois plus grosse que n'importe quelle galaxie ayant fusionné avec la Voie lactée. Elle devait être la troisième plus grosse galaxie du Groupe local après Andromède et notre galaxie.

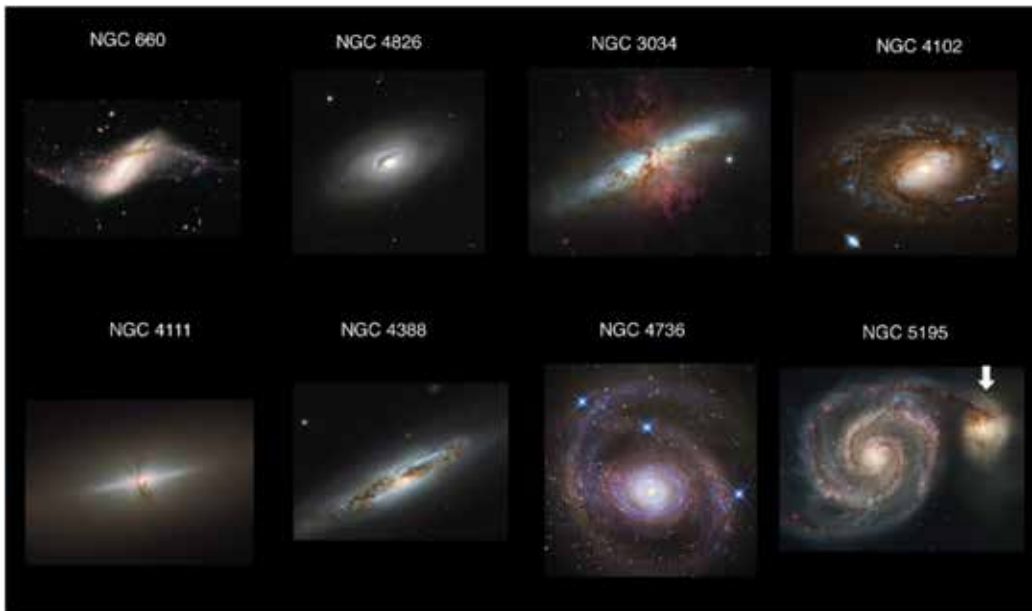
On pense que la galaxie compacte M32, compagne de M31, est le résidu du noyau de

La destruction de M32p par Andromède a dispersé ses étoiles en un halo géant mais en laisse intact le noyau sous la forme de la galaxie compacte M32.
(R. D'Souza; Wei-Hao Wang; AAS/IO)



M32p. Cela explique les propriétés uniques de cette galaxie, l'une des plus compactes connues, contenant beaucoup d'étoiles jeunes malgré son aspect de vieille elliptique.

Il y a très longtemps, la liste des principales galaxies du Groupe local aurait dû comprendre un membre supplémentaire, M32p. (Richard D'Souza; Wei-Hao Wang; NASA/JPL; NOAO/AURA/NSF)



Les galaxies proches – et donc de l'Univers actuel – nous offrent quelques analogues possibles de M32p.

MACS1149-JD1

Basé sur un communiqué ESO

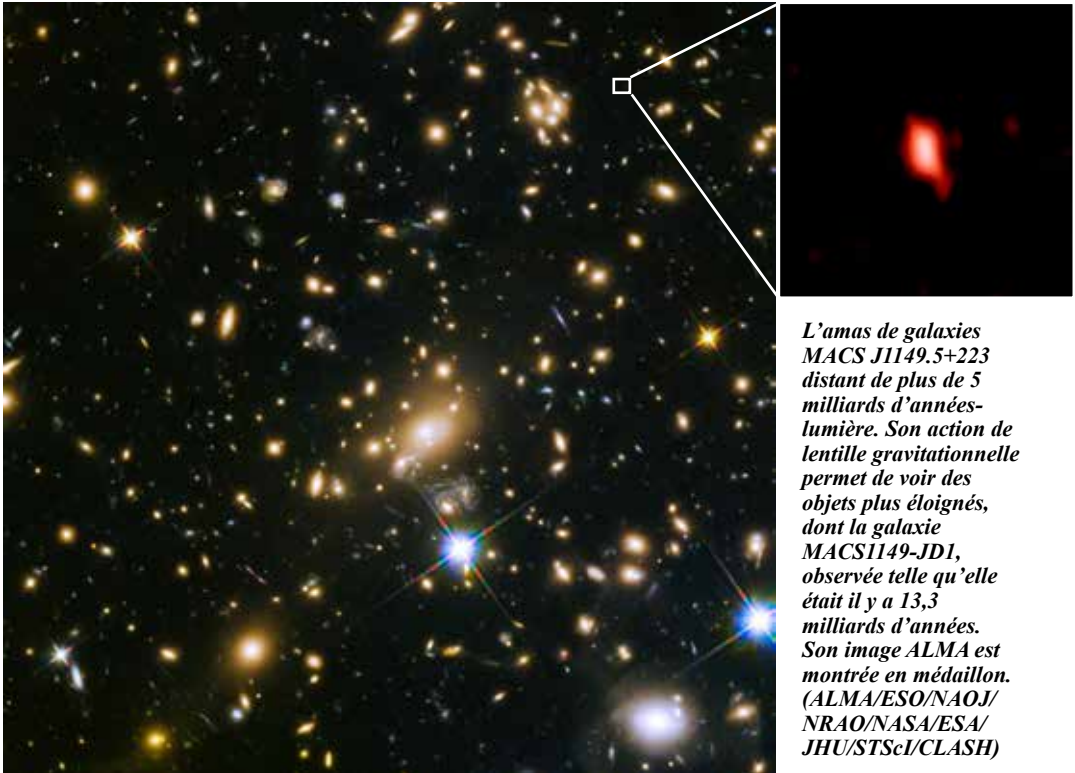
Les observations réalisées avec le réseau ALMA ont permis de déceler la présence d'oxygène ionisé et d'hydrogène dans la galaxie lointaine MACS1149-JD1. Le décalage vers le rouge – un redshift de 9,1 – indique que les photons avaient été émis il y a 13,3 milliards d'années, soit 500 millions d'années après le Big Bang. C'est la détection d'oxygène la plus lointaine à ce jour. Elle atteste de l'existence de générations stellaires antérieures dans cette galaxie.

Pour dater la première génération d'étoiles les astronomes avaient entrepris de reconstituer l'histoire antérieure

de MACS1149-JD1 au moyen de données acquises par les télescopes spatiaux Hubble et Spitzer. Ces données ont été insérées dans un modèle numérique qui a pu fixer le début de la formation des étoiles à 250 millions d'années après le Big Bang. La luminosité observée de la galaxie s'en est ainsi trouvée expliquée.

L'âge avancé des étoiles observées au sein de MACS1149-JD1 pose la question suivante : à quelle époque les galaxies ont-elles émergé de l'obscurité totale ? En d'autres termes, de quelle époque date la fameuse « aube cosmique » ?

L'observation de cette galaxie lointaine a été favorisée par l'effet de lentille gravitationnelle exercé par la masse de l'amas de galaxies MACS J1149.5+2223.



L'amas de galaxies MACS J1149.5+223 distant de plus de 5 milliards d'années-lumière. Son action de lentille gravitationnelle permet de voir des objets plus éloignés, dont la galaxie MACS1149-JD1, observée telle qu'elle était il y a 13,3 milliards d'années. Son image ALMA est montrée en médaillon. (ALMA/ESO/NAOJ/NRAO/NASA/ESA/JHU/STScI/CLASH)

Étoiles massives

Basé sur un communiqué ESO

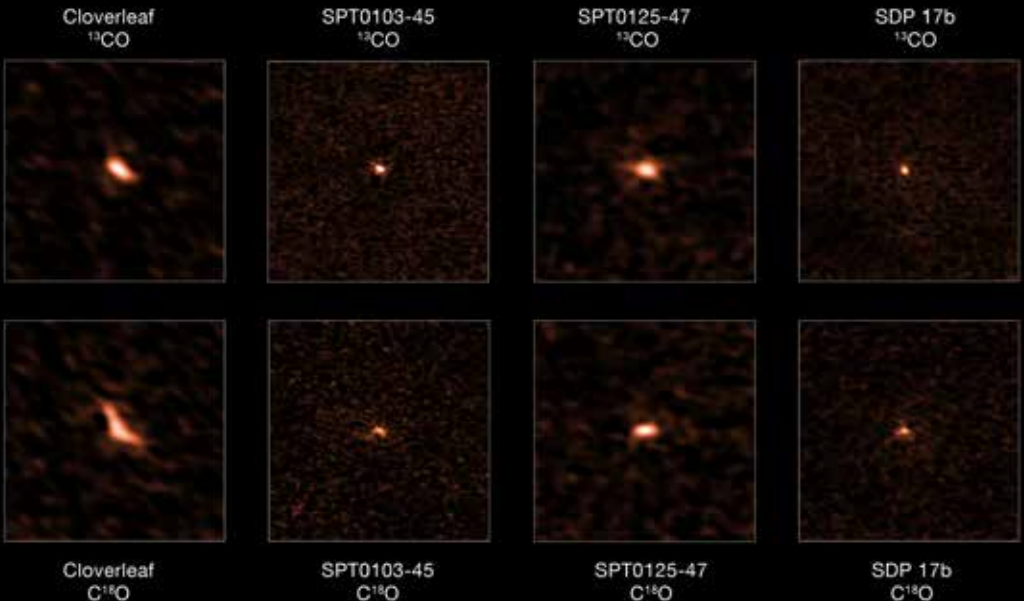
Les galaxies à sursauts d'étoiles sont des galaxies traversant une phase d'intense formation stellaire. Le rythme auquel elles créent de nouvelles étoiles peut être plus de 100 fois supérieur au taux de formation stellaire caractéristique de notre galaxie, la Voie lactée. Les étoiles massives émettent un rayonnement ionisant, des vents stellaires, et achèvent leurs existences en supernovæ, ce qui influence de manière significative l'évolution dynamique et chimique du milieu environnant. L'étude de la distribution en masse des étoiles dans ces galaxies permet de mieux comprendre leur propre évolution, et plus généralement, l'évolution de l'Univers.

Afin de sonder l'Univers lointain et de déterminer la proportion d'étoiles massives contenues au sein de quatre galaxies à forma-

tion d'étoiles riches en gaz les astronomes ont utilisé le réseau ALMA. Comme ces galaxies appartiennent à l'Univers très jeune il est peu probable qu'elles aient déjà connu de nombreux épisodes de formation stellaire, susceptibles de fausser les résultats obtenus.

Les astronomes ont adopté de nouvelles techniques pour estimer la proportion d'étoiles massives des galaxies, en utilisant notamment la mesure des abondances isotopiques du

Sur cette image figurent les quatre galaxies lointaines à sursauts d'étoiles observées par ALMA. L'image supérieure détaille l'émission de ^{13}CO de chaque galaxie. L'image inférieure se réfère à leur émission de C^{18}O . Le rapport de ces deux isotopes a conduit les astronomes à déterminer l'excès en étoiles massives de ces galaxies à sursauts d'étoiles. (ALMA/ESO/NAOJ/NRAO, Zhang et al.)



Vue d'artiste d'une galaxie poussiéreuse de l'Univers lointain qui donne naissance à des étoiles à un rythme beaucoup plus élevé que notre galaxie, la Voie lactée. Les observations d'ALMA (simulées dans la moitié inférieure de l'image) permettent de mesurer les abondances isotopiques des gaz. (ESO/M. Kornmesser)



monoxyde de carbone dans leur composante gazeuse.

Les isotopes de carbone et d'oxygène sont d'origines distinctes. Les étoiles massives créent davantage d'oxygène 18 (noté ^{18}O , l'isotope le plus commun étant ^{16}O , de masse 16), tandis que les étoiles de faible masse ou de masse intermédiaire produisent davantage de carbone 13 (^{13}C ; l'isotope normal est de masse 12). Ces isotopes sont stables et leurs abondances augmentent tout au long de la durée de vie d'une galaxie, leur synthèse résultant des réactions de fusion nucléaire se produisant à l'intérieur des étoiles.

La masse d'une étoile est le facteur déterminant son évolution future. Les étoiles massives brillent de façon intense et s'éteignent rapidement, tandis que les étoiles de faible masse comme le Soleil émettent un rayonnement plus modeste des milliards d'années durant. Connaissant les proportions d'étoiles de masses différentes qui naissent dans les galaxies, les astronomes peuvent affiner leur compréhension de la formation et de l'évolution des galaxies au fil de l'histoire de l'Univers. Le rapport $^{18}\text{O}/^{13}\text{C}$ caractérisant les galaxies à formation d'étoiles de l'Univers jeune est dix fois supérieur à celui caractérisant

les galaxies semblables à la Voie lactée. Cela implique que les galaxies à sursauts d'étoiles contiennent une proportion nettement plus élevée d'étoiles massives.

La découverte d'ALMA est cohérente avec une autre découverte, relative à l'Univers local. Des relevés spectroscopiques de 800 étoiles de la région de formation stellaire 30 Doradus dans le Grand Nuage de Magellan ont été effectués afin de cartographier la distribution des âges et des masses stellaires. Cette étude fut l'une des premières à produire des résultats suffisamment détaillés pour montrer que l'Univers est capable de produire des zones de formation d'étoiles caractérisées par des distributions de masses différentes de celle de la Voie lactée.

Des étoiles dont la masse excède les 30 masses solaires ont été détectées dans des proportions supérieures de 30% à la norme. Les étoiles dont la masse excède les 60 masses solaires étaient quant à elles supérieures en nombre de 70% à la proportion attendue. Ces résultats questionnent l'existence supposée du seuil de 150 masses solaires qu'une étoile nouvelle ne pourrait dépasser. Ils suggèrent même que ce seuil pourrait être porté à 300 masses solaires !

Diamants dans l'espace

Les astronomes cherchaient depuis des décennies les responsables d'une émission micro-onde (AME, anomalous microwave emission) provenant de différentes régions de la Voie lactée. On savait qu'elle était produite par des nanoparticules en rotation rapide, sans pouvoir dire lesquelles. On avait envisagé des hydrocarbures aromatiques polycycliques (PAH), des molécules que l'on trouve un peu partout dans l'Univers et qui sont connues pour leur émission infrarouge.

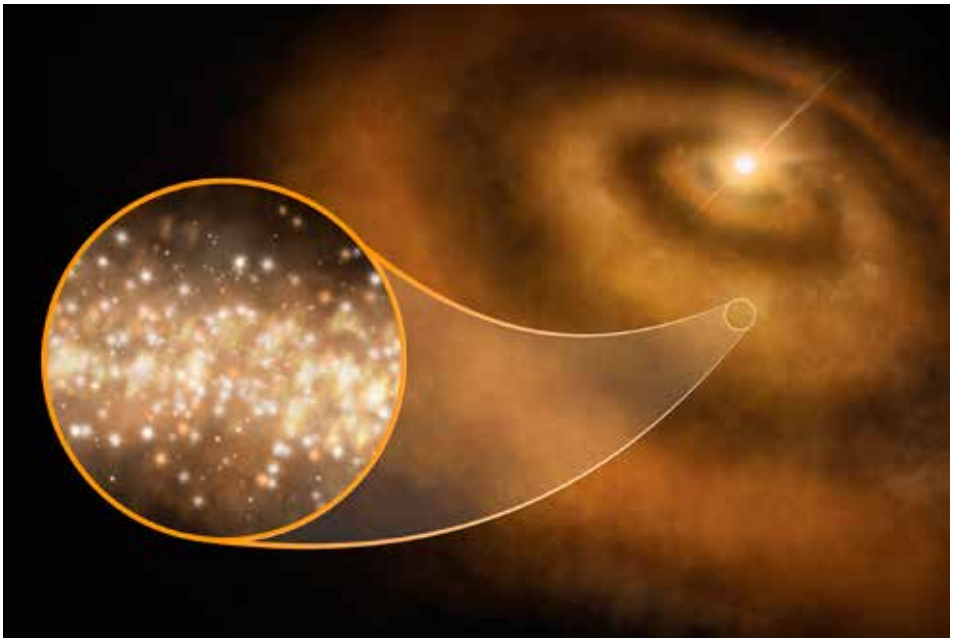
Des observations réalisées avec le radiotélescope de Green Bank (GBT) en Virginie et le réseau ATCA (Australia Telescope Compact Array) ont enfin permis de pointer du doigt trois sources indiscutables d'AME, les disques protoplanétaires entourant les étoiles jeunes V892 Tau, HD 97048, et MWC 297. L'émission infrarouge de ces sources diffère de celle des PAH et correspond à des nanodiamants et plus particulièrement des nanodiamants hydrogénés, c'est-à-dire portant des molécules hydrogénées sur leur surface. Ces particules se forment naturellement dans les

disques protoplanétaires et on en trouve dans les météorites.

Selon les estimations des astronomes, de 1 à 2 % du carbone des disques protoplanétaires se trouve dans des nanodiamants.

Cette découverte a des implications en cosmologie et devrait faciliter la recherche d'indices de l'inflation qui aurait marqué le début de l'Univers. Une polarisation particulière du fond diffus de rayonnement micro-onde serait une preuve de cette inflation, mais pour l'observer il faut éliminer toutes les autres causes de polarisation et parmi celles-ci celle de l'AME. Maintenant que l'on connaît son origine on peut estimer son importance – elle semble très faible – et mieux interpréter la leur micro-onde des débuts de l'Univers.

Impression d'artiste de nano-diamants entourant une étoile jeune et qui semblent être à l'origine de l'émission micro-onde anormale (AME).
(S. Dagnello, NRAO/AUI/NSF)



Une nouvelle méthode de détection d'exoplanètes jeunes

Basé sur un communiqué ESO

Le réseau ALMA a changé notre compréhension des disques protoplanétaires – ces usines à planètes constituées de gaz et de poussière qui encerclent les étoiles jeunes. Les anneaux et sillons qui parsèment ces disques plaident en faveur de l'existence de protoplanètes mais d'autres phénomènes pourraient être à l'origine de ces structures.

Une nouvelle méthode de détection de planètes, basée sur l'identification d'une dynamique inhabituelle du gaz qui emplit le disque protoplanétaire entourant une étoile jeune, a permis de confirmer l'origine planétaire de plusieurs structures. Le mouvement du gaz autour d'une étoile en l'absence de planètes suit un schéma très simple et prévisible à la

fois (rotation képlérienne), qu'il est quasiment impossible d'altérer, de manière cohérente et localement. De sorte que seule la présence d'un objet relativement massif est susceptible de générer de telles perturbations.

La mesure des mouvements du gaz à l'intérieur d'un disque protoplanétaire révèle avec une grande certitude la présence de planètes en orbite autour d'une étoile jeune. Cette technique ouvre une nouvelle piste pour comprendre les processus de formation des systèmes planétaires.

Afin d'aboutir à cette découverte les astronomes ont analysé les observations ALMA de HD 163296, une étoile deux fois plus massive que le Soleil, âgée de seulement 4 millions d'années et située à 330 années-lumière dans la constellation du Sagittaire. Les images surprenantes de HD 163296 et d'autres systèmes similaires acquises par ALMA ont

révélé des anneaux concentriques dans les disques protoplanétaires. Ces sillons peuvent témoigner de l'éjection de la poussière et du gaz par les protoplanètes le long de leurs orbites,

Sur cette image figure une partie de l'ensemble des données d'ALMA. L'existence d'une distorsion indique clairement la présence de l'une des planètes. L'emplacement prédit pour la planète est marqué en jaune.

(ALMA, ESO/NAOJ/NRAO ; Pinte et al)

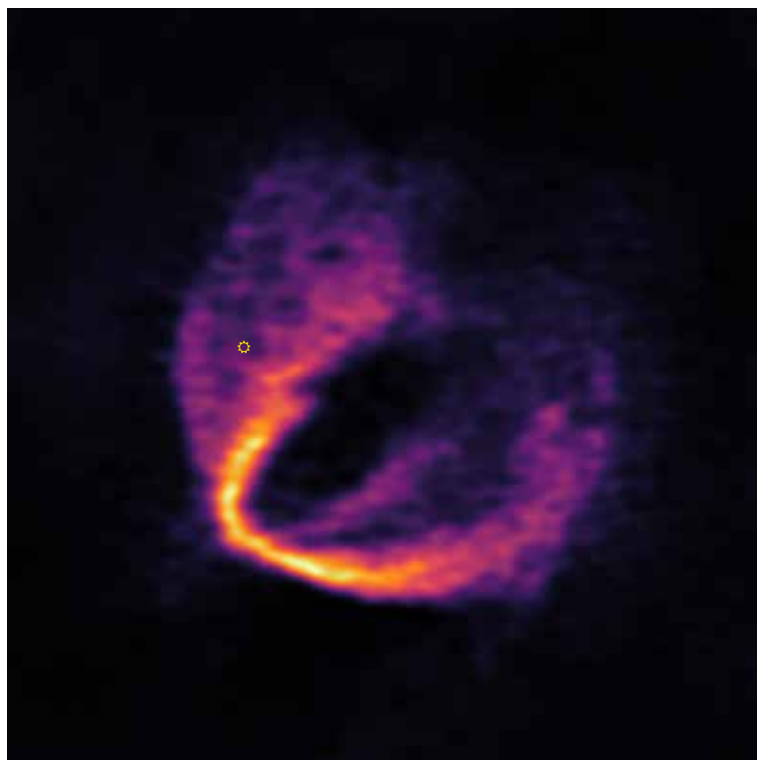




Image ALMA du disque entourant l'étoile jeune HD 163296. Les vides entre les anneaux suggèrent la présence de planètes à peine formées qui balayent leurs orbites. (ESO, ALMA/ESO/NAOJ/NRAO; A. Isella; B. Saxton, NRAO/AUI/NSF)

ainsi que de leur intégration au sein de leurs propres atmosphères. Une étude antérieure du disque de cette étoile révèle que les espaces vides de poussière et de gaz se chevauchent, suggérant qu'au moins deux planètes s'y sont formées. Toutefois, les observations initiales n'avaient fourni que des preuves circonstancielles et n'ont pu être utilisées pour estimer les masses des planètes.

Cette étoile est dotée d'une masse environ deux fois supérieure à celle du Soleil. Elle n'est toutefois âgée que de quatre millions d'années – ce qui représente un millième de l'âge du Soleil.

Plutôt que de se focaliser sur la poussière qui emplit le disque et que les observations d'ALMA permettent de cartographier avec précision, les astronomes ont étudié le monoxyde de carbone (CO) disséminé sur l'ensemble du disque. Les molécules de CO émettent une raie millimétrique très particulière qu'ALMA est capable d'observer en dé-

tail. De subtiles variations de longueur d'onde provoquées par l'effet Doppler révèlent les mouvements du gaz au sein du disque.

On a ainsi pu identifier la présence de trois planètes à 12, 21 et 39 milliards de kilomètres de l'étoile, soit 80, 140 et 260 fois la distance séparant la Terre du Soleil.

Les chercheurs ont identifié les zones de discontinuité dans le flot de gaz – similaires aux tourbillons qui se forment autour des rochers dans un torrent. En analysant ce mouvement avec soin, ils ont été en mesure d'estimer l'influence de corps planétaires de masses semblables à celle de Jupiter.

Cette nouvelle technique permet aux astronomes d'estimer les masses protoplanétaires avec une précision élevée. En outre, elle est moins susceptible de produire des faux positifs.

Cette technique s'apparente à celle ayant conduit à la découverte de la planète Neptune au cours du 19^e siècle. Dans ce cas, des anomalies repérées dans le mouvement de la planète Uranus avaient été attribuées à l'effet gravitationnel d'un corps inconnu, qui fut découvert visuellement en 1846 et s'avéra constituer la huitième planète du Système solaire.

Around Sgr A* : the stars S of the galactic center

Based on an ESO communication

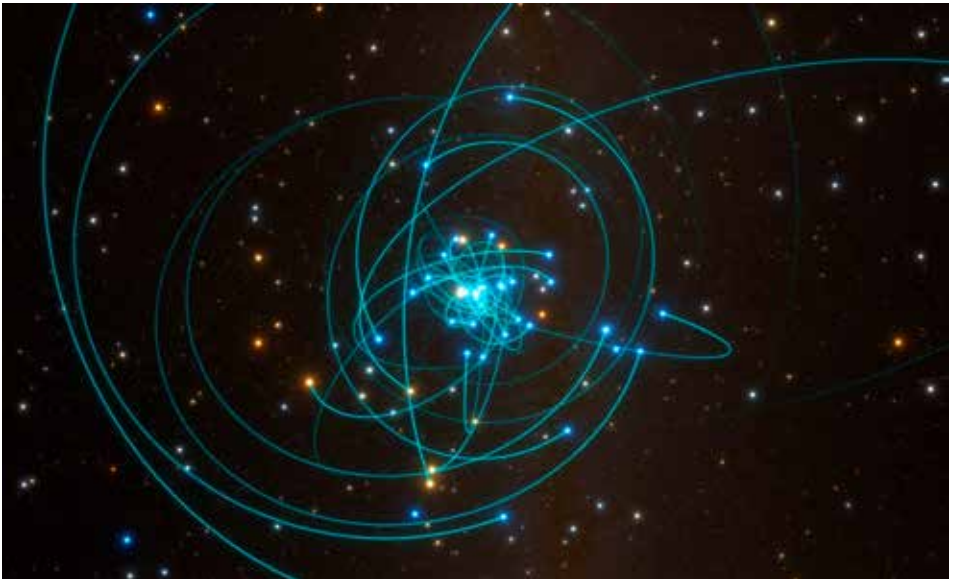
Dissimulé derrière d'épais nuages de poussière absorbante, le trou noir super-massif le plus proche de nous, Sgr A*, se situe à 26 000 années-lumière, au centre de la Voie lactée. Ce monstre gravitationnel, quatre millions de fois plus lourd que le Soleil, est entouré d'un petit groupe d'étoiles orbitant à vitesse élevée. Cet environnement extrême – le champ gravitationnel le plus intense de notre galaxie – constitue le laboratoire de test idéal de la physique gravitationnelle, en particulier de la théorie de la relativité générale d'Einstein.

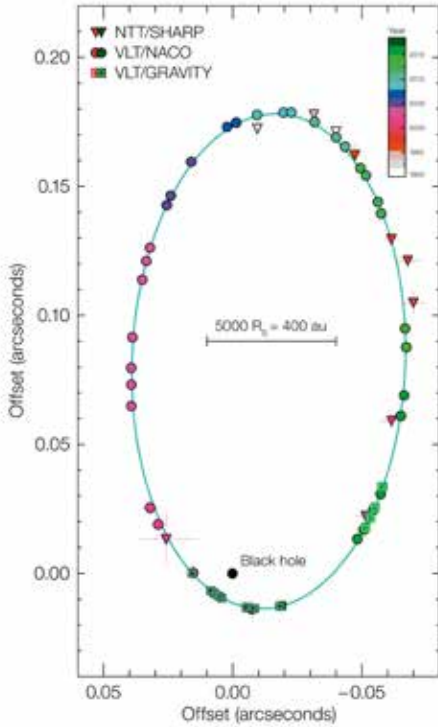
De nouvelles observations effectuées dans le domaine infrarouge par les instruments de très grande sensibilité, GRAVITY, SINFONI et NACO installés sur le VLT de l'ESO, ont permis aux astronomes de suivre, au cours du mois de mai 2018, le mouvement de l'une de ces étoiles baptisée S2, alors qu'elle passait à très grande proximité du trou noir. S2 effectue un tour complet autour du trou noir en 16 années, parcourant une orbite particulièrement excentrique qui



L'une des centaines d'images de la région de Sgr A* collectées avec NACO pour étudier le mouvement des étoiles. (ESO/MPE)

Simulation des orbites d'étoiles situées très près du trou noir supermassif de la Voie lactée. (ESO/L. Calçada/ spaceengine.org)

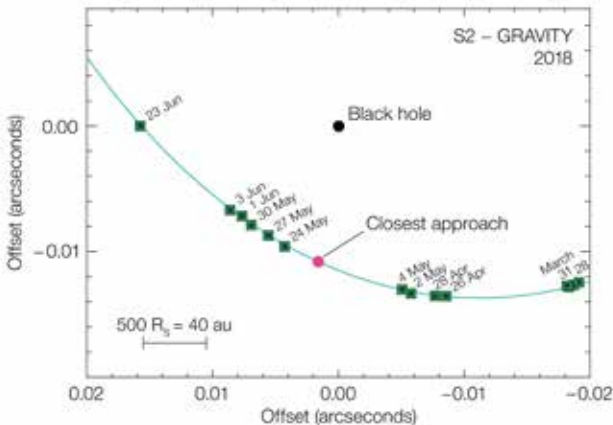




Trajectoire de l'étoile S2 autour du trou noir supermassif Sgr A*. Elle a été compilée à partir d'observations menées au moyen des télescopes et des instruments de l'ESO sur une durée de plus de 25 ans. 16 années sont nécessaires à l'étoile pour parcourir l'intégralité de son orbite. Elle a atteint le point le plus proche du trou noir en mai 2018. (ESO/MPE/GRAVITY Collaboration)

la rapproche de 20 milliards de kilomètres. Cette distance équivaut à 1 500 rayons de Schwarzschild du trou noir lui-même. À ce point de son orbite l'étoile se déplaçait à plus de 25 millions de kilomètres par heure – ce qui représente près de trois pour cent de la vitesse de la lumière.

L'équipe a comparé les mesures de position et de vitesse acquises par les instruments GRAVITY et SINFONI, et les observations antérieures de S2 effectuées au moyen d'autres instruments, aux prédictions de la théorie de la gravitation de Newton, de la théorie de la relativité générale et d'autres théories de la gravitation. Les résultats sont en parfait accord avec les prédictions de la théorie de la relativité générale.



Trajectoire de l'étoile S2 à proximité directe du trou noir et compilée à partir d'observations effectuées par l'instrument GRAVITY installé sur l'interféromètre du VLT. Au point le plus proche, l'étoile se déplaçait à près de 3% de la vitesse de la lumière. Ses variations de position ont fait l'objet d'un suivi quotidien. (ESO/MPE/GRAVITY Collaboration)

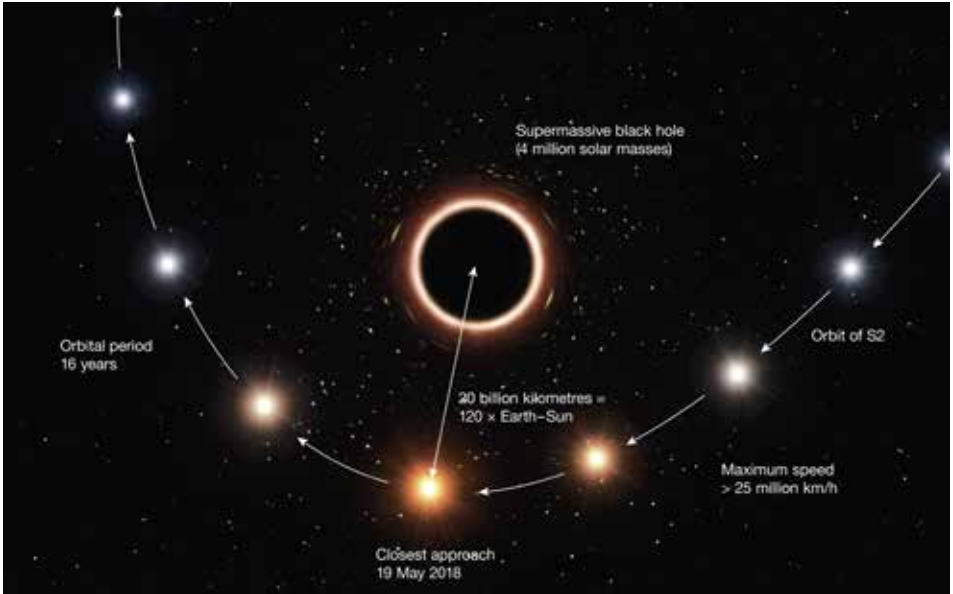


Illustration de la trajectoire de l'étoile S2 passant à proximité du trou noir supermassif situé au centre de la Voie lactée. À mesure qu'elle s'approche du trou noir, l'étoile rougit. Cet effet, prédit par la théorie de la relativité générale d'Einstein, résulte de la présence d'un champ gravitationnel très intense. Sur ce graphe, le rougissement ainsi que la taille des objets ont été exagérés. (ESO/M. Kornmesser)

Ces mesures d'une précision extrême constituent le point d'orgue d'observations toujours plus précises du centre de la Voie lactée menées durant 26 ans au moyen des instruments de l'ESO.

Les nouvelles mesures mettent clairement en évidence un effet de décalage vers le rouge d'origine gravitationnelle. La lumière émise par l'étoile est étirée vers de plus grandes longueurs d'onde par l'intense champ gravitationnel du trou noir. Et la variation de longueur d'onde de la lumière issue de S2 est en parfait accord avec celle déduite de la théorie de la relativité générale d'Einstein. C'est la première fois que cet écart aux prédictions

de la théorie de la gravitation de Newton est observé dans le mouvement d'une étoile en orbite autour d'un trou noir super-massif.

L'équipe a utilisé SINFONI pour déterminer la vitesse de S2 le long de la ligne de visée et l'instrument interférométrique GRAVITY pour effectuer des mesures extraordinairement précises de la trajectoire de S2 afin de définir les contours de son orbite. GRAVITY donne des images nettes qui traduisent le mouvement de l'étoile autour du trou noir nuit après nuit.

Plus d'un siècle après la publication de son article explicitant les équations de la relativité générale, Einstein voit sa théorie de nouveau confortée – après avoir été confrontée au laboratoire le plus extrême qui soit et qu'il ait pu imaginer.

Les observations en cours sont susceptibles de révéler prochainement l'existence d'un autre effet relativiste – une petite rotation de l'orbite de l'étoile, ou précession de Schwarzschild – à mesure que S2 s'éloigne du trou noir.

Autour de Sgr A* : les objets G du centre galactique

L'environnement du centre de la Voie lactée a été assidûment observé depuis douze ans avec un spectrographe des télescopes Keck d'Hawaii. L'idée était d'identifier de subtiles modifications de la forme et de la vitesse des nuages de gaz proches du trou noir supermassif. À leur grand étonnement, les astronomes découvrirent plusieurs objets compacts, poussiéreux. Les deux premiers, G1 et G2, ont été trouvés rapidement, il y a dix ans déjà, et l'on a pu suivre leur trajectoire autour du trou noir. S'il s'était agi de nuages, ils n'auraient pu survivre intacts aux passages près du trou noir.

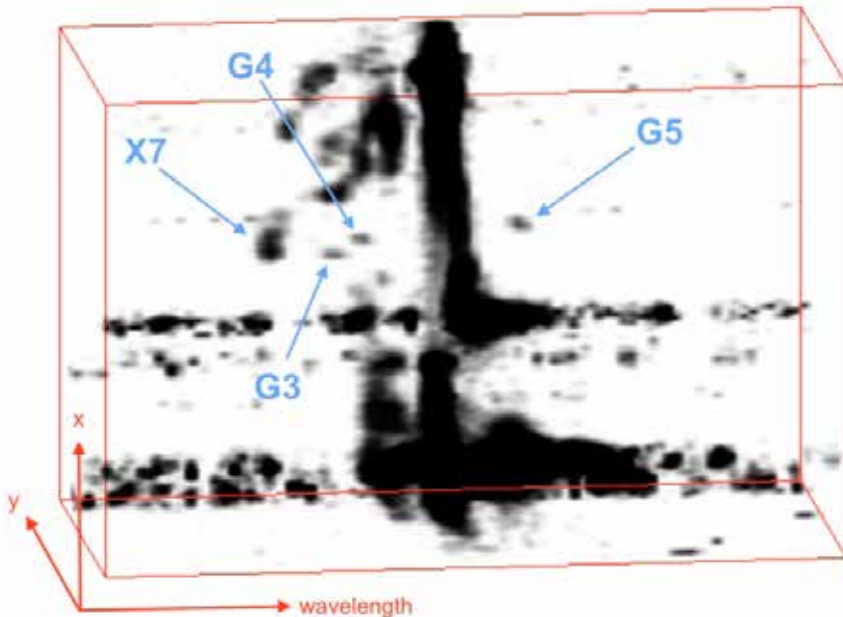
Les astronomes font l'hypothèse que ce sont des étoiles enflées dont le trou noir parvient à arracher de la matière à chaque passage, mais qui réussissent malgré tout à résister à une destruction totale. Ces étoiles seraient le résultat de fusions d'étoiles déclen-

chées par la gravité du trou noir. Ces fusions donnent des astres distendus qui mettent très longtemps, peut-être un million d'années, avant de reprendre la configuration compacte d'étoiles normales.

Les autres objets, G3, 4 et 5, vont frôler à leur tour le trou noir central, mais seulement dans 20 ans, et plus. Il faudra donc beaucoup de patience pour vérifier si le même scénario est valable. En attendant, il sera toujours instructif de suivre leur évolution dynamique pour mieux comprendre l'environnement mystérieux du centre de la Voie lactée.

Les nouveaux objets G auprès du centre de la Voie lactée. Le diagramme donne la position spatiale apparente (x,y) et la vitesse, via l'effet Doppler sur la longueur d'onde.

(W.M. Keck Observatory)



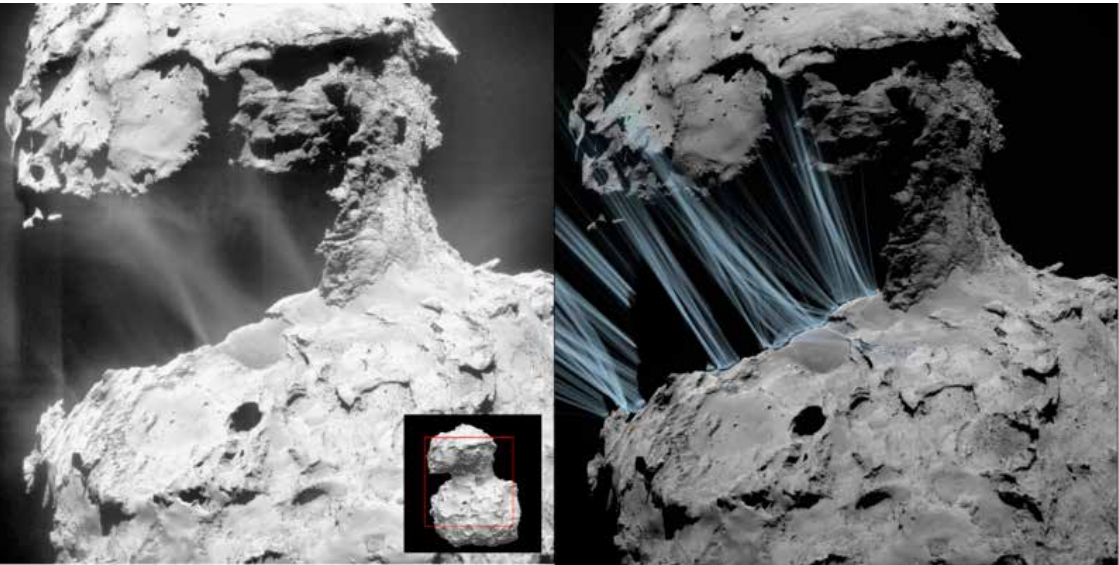
Les jets de 67P

La sonde Rosetta de l'ESA a passé deux ans en orbite autour du noyau de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko donnant à sa caméra OSIRIS l'occasion de prendre plus de 70 000 clichés de l'astre à la silhouette de canard.

Au long de cette campagne, les chercheurs remarquaient qu'en plus d'éruptions occasionnelles de gaz et de poussière, la comète développait des jets régulièrement tous les matins lorsque les rayons du Soleil réchauffaient les plaques de givre. La surface devenait instantanément active le long du terminateur, générant ainsi une vague de jets avec la période de rotation du noyau. Chaque matin on retrouvait les mêmes jets aux mêmes endroits, avec les mêmes caractéristiques. Cette activité matinale résulte du givre distribué uniformément sur la surface du noyau. Les jets occasionnels proviennent de zones restreintes où de la glace se trouve soudainement exposée à la suite, par exemple, d'un éboulement.

Les chercheurs ne comprirent pas immédiatement pourquoi des jets se formaient plutôt que de simples nuages. Une nouvelle étude a montré qu'ils résultent de la topographie tarabiscotée de 67P. En analysant des images prises sous différents angles de la région Hapi, sur le « cou » séparant les deux lobes du noyau, les astronomes ont vu que le givre s'évaporait le plus dans les endroits les mieux éclairés. Les dépressions, cratères, puits, concentraient efficacement les émissions de gaz et de poussières à la façon de lentilles. On a même pu en réaliser la modélisation. La forme tourmentée du noyau de 67P s'est révélée une aubaine pour les scientifiques. Si elle avait été bien régulière, les émissions de gaz auraient été plus homogènes, diluées, et n'auraient pas montré de concentrations marquées, plus faciles à étudier.

Les jets matinaux de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko photographiés par Rosetta (à gauche) et modélisés par ordinateurs en se basant sur la topographie du noyau (à droite). (ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA)



Les éclairs de Jupiter

Depuis le survol de Jupiter par Voyager 1 en mars 1979, les scientifiques se sont interrogés sur l'origine des éclairs : leur signature radio est sous certains aspects sensiblement différente de celle des éclairs terrestres.

Avant l'entrée en scène de la sonde Juno, les éclairs de Jupiter n'avaient été observés que dans le bande radio des kilohertz et dans le domaine visible, et l'on se demandait pourquoi ils n'apparaissaient pas dans le domaine des mégahertz.

Juno dispose d'un récepteur couvrant un large domaine de fréquence, le MWR (Microwave Radiometer Instrument). Au cours des huit premiers survols le MWR a détecté pas moins de 377 décharges, et ce dans les méga- et gigahertz comme pour les

éclairs terrestres. La basse altitude de Juno fait toute la différence en permettant d'observer des fréquences qui sont peu absorbées dans l'ionosphère.

Ces ressemblances avec les éclairs terrestres ne doivent pas cacher des différences importantes. Alors que les orages sont les plus abondants autour de l'équateur de la Terre, sur Jupiter ils se concentrent surtout près des pôles.

La responsable de cet état de chose est la température. Chez nous elle est due au Soleil et est la plus forte à l'équateur. L'air humide s'y élève plus volontiers, ce qui produit des cellules convectives et des orages.

Cinq fois plus loin du Soleil, Jupiter reçoit 25 fois moins de rayonnement solaire. La majorité de la chaleur dans l'atmosphère provient de l'intérieur – le reliquat de l'énergie

gravifique emmagasinée lors de la formation de la planète.

L'équateur n'est donc que légèrement plus chaud que les pôles, mais ce petit supplément entraîne une certaine stabilité de l'atmosphère qui est absente aux pôles où peuvent se développer la convection et les orages.

Cela ne résout cependant pas tout. Le pôle nord connaît beaucoup plus d'éclairs que le sud. On peut difficilement invoquer un effet saisonnier puisque l'axe de rotation de la planète est quasi perpendiculaire à son orbite.



Des éclairs ont été dessinés sur cette image de Jupiter prise par Juno. (NASA)