



# L'astronomie dans le monde

## *Matière sombre*

*Basé sur un communiqué ESO*

En 1933 le génial Fritz Zwicky suggérait l'existence d'une matière invisible, la « dunkle Materie ». L'astronome suisse basait cette conclusion sur l'observation des mouvements des galaxies de l'amas de Coma. Les données du moment indiquaient que les galaxies devaient être 400 fois plus massives que leur contenu stellaire. Selon les connaissances actuelles, le rapport est nettement moindre mais la conclusion était correcte. La majeure partie de la masse des galaxies est invisible et l'on ne sait toujours pas de quoi elle est faite.

C'est dans les années 70 que l'observation des étoiles à la périphérie des galaxies permettait à l'équipe de Vera Rubin de confirmer sans ambiguïté cette hypothèse. Les étoiles tournent autour des galaxies beaucoup plus vite qu'elle ne le devraient si l'attraction n'était due qu'aux étoiles dont la masse est inférée de la luminosité globale. Sans cette puissante attraction les galaxies voleraient en éclats.

Le disque d'une galaxie spirale fait un tour en plusieurs centaines de millions d'années. La densité de matière ordinaire décroît en périphérie. Si la masse d'une galaxie se résumait à celle de la seule matière ordinaire, les régions extérieures, plus diffuses, seraient animées d'une vitesse de rotation inférieure à celle du centre galactique, plus dense. Les observations de galaxies spirales voisines de

la nôtre indiquent que leurs régions centrales et périphériques sont dotées de vitesses de rotation identiques. Ces « courbes de rotation plates » suggèrent que les galaxies spirales sont constituées de vastes quantités de matière noire distribuée en halo autour du disque galactique.

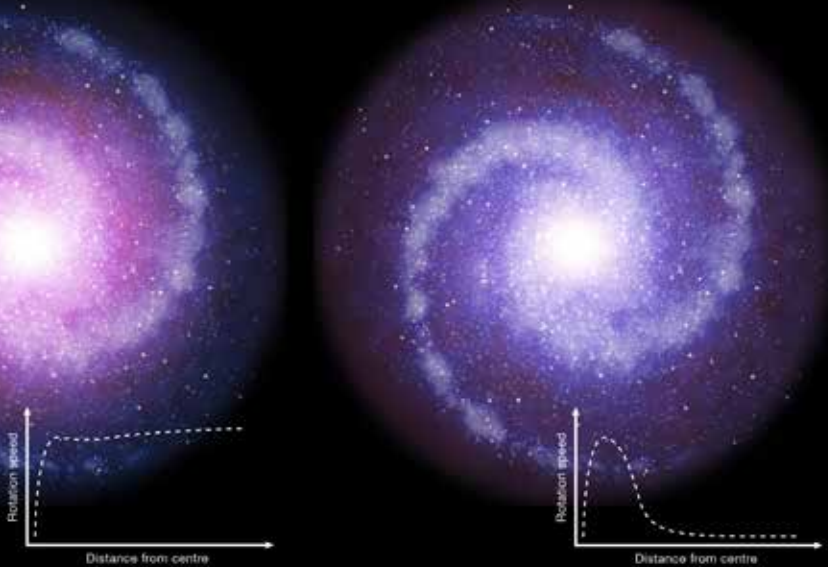
Cette matière sombre (ou cachée, noire, manquante, invisible...) est un élément essentiel de la cosmologie actuelle et un facteur-clé de l'évolution des galaxies et de l'Univers. C'est dans les concentrations de matière sombre que se forment les galaxies. Le gaz se concentre alors sous forme d'un disque en se dégageant de la matière noire.

Les astronomes ont utilisé les instruments KMOS et SINFONI du VLT de l'ESO pour déterminer les vitesses de rotation de six galaxies massives, à taux de formation stellaire élevé, peuplant l'Univers lointain et datant de 10 milliards d'années, l'âge d'or de la formation galactique,

Le fruit de leurs observations est tout à fait surprenant : à la différence des galaxies spirales de l'Univers actuel, les régions périphériques de ces galaxies distantes semblent animées d'une vitesse de rotation inférieure à celle des régions situées à plus grande proximité du noyau central – suggérant la moindre présence de matière noire. La raison en est probablement double. D'une part, la plupart de ces galaxies massives et précoces sont dominées par la matière ordinaire, la matière noire jouant un rôle bien plus secondaire que

Nearby Universe

Remote Universe



ce n'est le cas au sein de l'Univers actuel. D'autre part, les disques primitifs étaient bien plus turbulents que les galaxies spirales qui peuplent notre environnement cosmique.

Ces deux effets semblent se renforcer lorsque les astronomes observent des régions plus distantes et un passé plus lointain. Ces résultats suggèrent que 3 à 4 milliards d'années après le Big Bang, le gaz contenu au sein des galaxies s'était déjà condensé en disques plats en rotation, autour desquels se distribuaient de vastes halos de matière noire bien plus diffuse. Il semblerait que des milliards d'années supplémentaires aient été nécessaires à la condensation de la matière noire, de sorte que ses effets ne prédominent qu'à l'heure actuelle.

Cette hypothèse rejoint diverses observations attestant de la plus grande richesse en gaz et de la compacité plus élevée des galaxies précoces comparées aux galaxies actuelles.

Les six galaxies cartographiées dans le cadre de cette étude sont issues d'un plus vaste échantillon constitué

*Représentation schématique de disques galactiques en rotation de l'Univers jeune et de l'Univers actuel. Des observations effectuées au moyen du Very Large Telescope de l'ESO suggèrent que les disques galactiques massifs à formation d'étoiles de l'Univers jeune étaient soumis à une moindre influence de la matière noire. En conséquence, les régions périphériques des galaxies lointaines sont animées d'une rotation plus lente que les régions périphériques des galaxies peuplant l'Univers local. Leurs courbes de rotation, loin d'être plates, s'infléchissent à mesure que la distance au centre augmente. (ESO)*

d'une centaine de disques lointains, caractérisés par des taux de formation stellaire élevés, et imagés par les instruments KMOS et SINFONI. Outre les mesures de galaxies individuelles rapportées ci-dessus, une courbe de rotation moyenne a été déduite des faibles signaux en provenance des autres galaxies. Cette courbe composite a confirmé la diminution des vitesses de rotation au fil de l'éloignement des centres galactiques. Deux autres études concernant 240 étoiles entourées de disques confortent également ces résultats.

Typiquement, la matière ordinaire représente environ la moitié de la masse galactique totale. À des redshifts élevés toutefois, elle domine complètement la dynamique des galaxies selon une modélisation détaillée.

## ***Abell 2744 vu par ALMA***

*Basé sur un communiqué ESO*

La galaxie A2744\_YD4 située derrière l'amas Abell 2744 est devenue la plus jeune et la plus lointaine détectée à ce jour par ALMA. À la surprise des astronomes cette galaxie renferme une vaste quantité de poussière interstellaire, issue d'une précédente génération d'étoiles. Des observations de suivi effectuées au moyen de l'instrument X-shooter installé sur le VLT de l'ESO ont confirmé l'énorme distance nous séparant de A2744\_YD4. Cette galaxie nous apparaît telle qu'elle était lorsque l'Univers n'était âgé que de 600 millions d'années, ce qui correspond à un redshift de 8,38. Cette époque où se formèrent les premières étoiles et les premières galaxies se situe au cours de la période de réionisation.

La détection d'une telle abondance de poussière indique également que les premières supernovæ avaient déjà pollué l'environnement galactique. La poussière cosmique est principalement composée de grains de silicium, de carbone et d'aluminium, dont le diamètre n'excède pas le millionième de centimètre. Les éléments chimiques qui composent ces grains sont produits au sein des étoiles puis diffusés dans l'espace lorsque les étoiles massives explosent en supernovæ – phase finale de leur courte existence. Aujourd'hui, cette pou-

sière est omniprésente. Elle constitue l'élément essentiel pour la constitution des étoiles, des planètes et des molécules complexes. Par contre, aux premiers instants de l'Univers, elle était rare, la première génération d'étoiles n'ayant pas encore amorcé la phase explosive finale.

Les observations de la galaxie poussiéreuse A2744\_YD4 ont été rendues possibles par la présence, sur la ligne de visée, de l'amas de galaxies Abell 2744. Cet amas très massif est distant de 3,5 milliards d'années-lumière (redshift 0,308). Il semble résulter de la collision de quatre amas de galaxies de plus petite taille. L'énorme choc collisionnel d'une durée de 350 millions d'années s'est traduit par la survenue de divers phénomènes étranges, ce qui a valu à Abell 2744 d'être surnommé l'Amas de Pandore. Les galaxies ne représentent que cinq pour cent de la masse de l'amas – contre septante-cinq pour cent pour la matière noire. Cette dernière contribue donc principalement à l'effet de lentille gravitationnelle qui se traduit par la déformation et l'amplification de la lumière en provenance des galaxies plus lointaines. Les vingt autres pour cent de la masse totale de l'amas se présentent sous la forme de gaz chaud.

Les observations d'ALMA ont par ailleurs permis de détecter l'émission d'oxygène ionisé au sein de la galaxie A2744\_YD4. Il s'agit de la détection la plus lointaine, et donc la plus ancienne, d'oxygène dans l'Univers, et elle supplante un autre résultat d'ALMA datant de 2016.

La détection de poussière au sein de l'Univers jeune nous renseigne sur les premières explosions d'étoiles en supernovæ, et donc sur cette époque à laquelle l'Univers baignait dans la lumière issue des toutes premières étoiles chaudes. La détermination de cette « aube cosmique » constitue l'un des objectifs premiers de l'astronomie moderne. L'étude de la poussière interstellaire générée alors en représente une source indirecte.

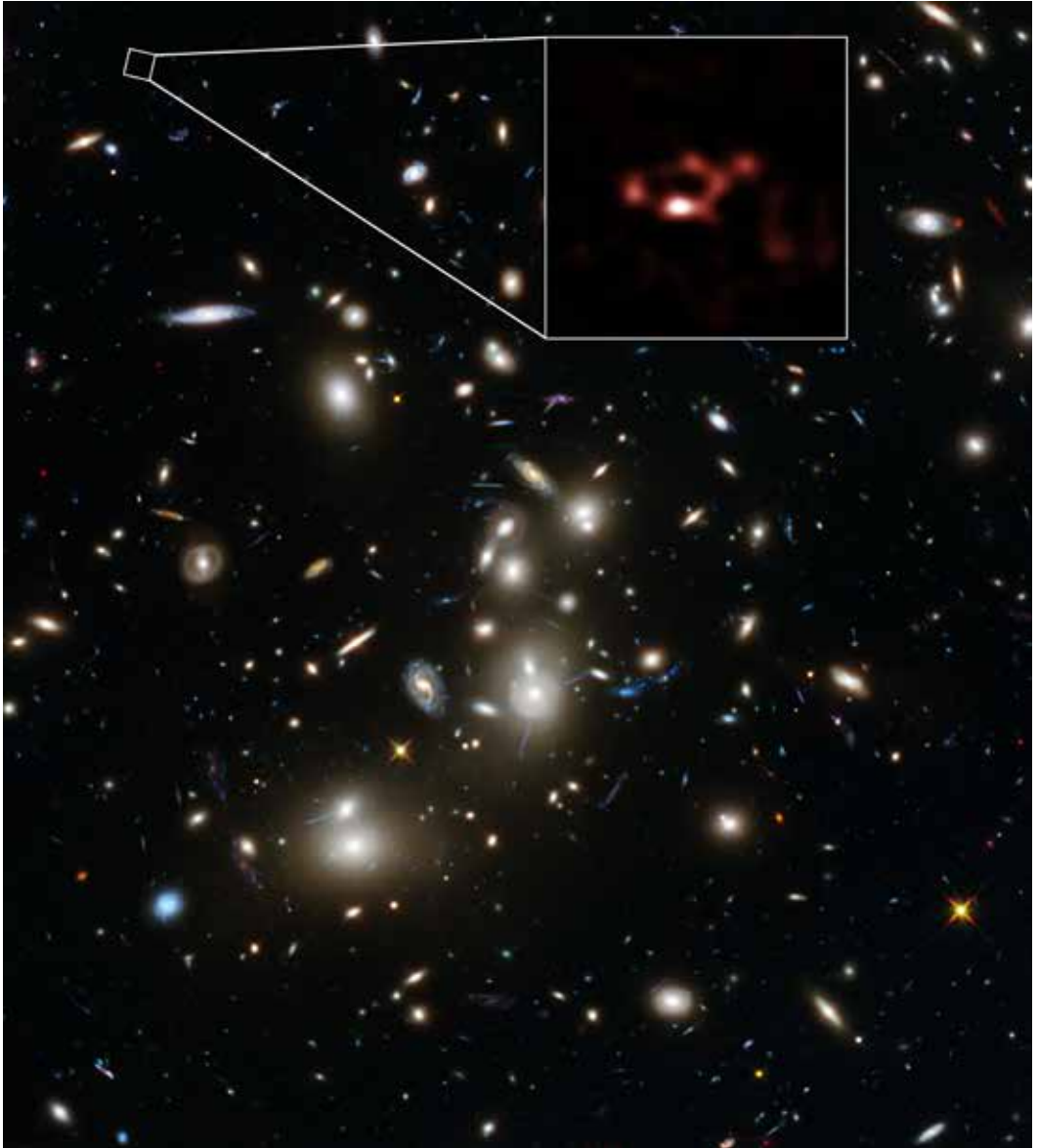
On estime que la galaxie A2744\_YD4 contient environ six millions de masses solaires sous forme de poussière et deux milliards de masses solaires sous forme d'étoiles.



Le taux de formation stellaire a pu être évalué. Les étoiles naissaient au rythme annuel de 20 masses solaires – contre une masse solaire par an dans la Voie lactée. Ce taux n’est pas inhabituel pour une galaxie aussi distante. Il révèle le rythme soutenu de formation de la poussière au sein de A2744\_YD4. Le temps requis avoisine les 200 millions d’années seulement – nous observons donc cette galaxie peu après sa formation.

En d’autres termes, la formation significative d’étoiles au sein de cette galaxie débuta quelque 200 millions d’années avant l’époque à laquelle nous l’observons aujourd’hui. Ces observations ouvrent une fenêtre d’étude de cette période d’allumage des premières étoiles et galaxies. Le Soleil, la Terre, notre existence même, constituent les ultimes produits – 13 milliards d’années plus tard – de cette première génération d’étoiles. En étudiant leur formation, leur cycle de vie et de mort, nous sondons nos propres origines.

*Sur cette vue d’artiste figure une représentation réaliste de la galaxie jeune et lointaine A2744\_YD4. Des observations effectuées au moyen d’ALMA ont montré que cette galaxie, qui nous apparaît telle qu’elle était lorsque l’Univers n’était âgé que de 4% de son âge actuel, est riche en poussière. Cette poussière constitue le fruit d’une génération stellaire antérieure. Ces observations offrent un aperçu du cycle de vie et de mort explosive des toutes premières étoiles de l’Univers.  
(ESO/M. Kornmesser)*



*Le riche amas de galaxies Abell 2744 vu par le télescope spatial Hubble. Au-delà de cet amas on peut voir la galaxie faiblement lumineuse A2744\_YD4 telle qu'elle était lorsque l'Univers n'était âgé que de 600 millions d'années. Des observations effectuées avec ALMA révèlent une forte abondance en poussière. (ALMA/ESO/NAOJ/NRAO, NASA, ESA, ESO, D. Coe/STScI, J. Merten/Heidelberg/Bologna)*

## ***Bousculade dans Orion***

Les interactions gravitationnelles dans un système stellaire de la nébuleuse d'Orion ont conduit à l'éjection à grande vitesse d'au moins trois étoiles. Ces étoiles hyper-véloces n'ont été décelées que récemment. Deux d'entre elles avaient été découvertes grâce à des observations infrarouges et radio permettant de percer les brumes de la nébuleuse. Elles se déplacent à très grande vitesse dans des directions opposées. Leur origine était mystérieuse mais on pouvait en déduire qu'elles provenaient de la désintégration d'un système il y a 540 ans. Cependant, le bilan mécanique posait un problème. Il manquait au moins une étoile pour le satisfaire.

Le télescope spatial Hubble a trouvé cette pièce manquante du puzzle : une troisième étoile dont on peut tracer l'origine au même endroit de la nébuleuse que les deux autres il y a 540 années.

Les trois étoiles se trouvent au cœur de la nébuleuse d'Orion, dans la petite nébuleuse de Kleinmann-Low qui renferme un amas d'étoiles jeunes. Leur vitesse est une trentaine de fois plus grande que celle des autres étoiles de l'amas. Elles n'ont que quelques centaines de milliers d'années et sont encore entourées des restes de leur nuage primordial.

Les simulations numériques prédisent effectivement de telles bousculades entre étoiles d'amas jeunes. La nébuleuse d'Orion doit certainement renfermer d'autres exemples d'étoiles éjectées dans un passé plus ou moins récent.

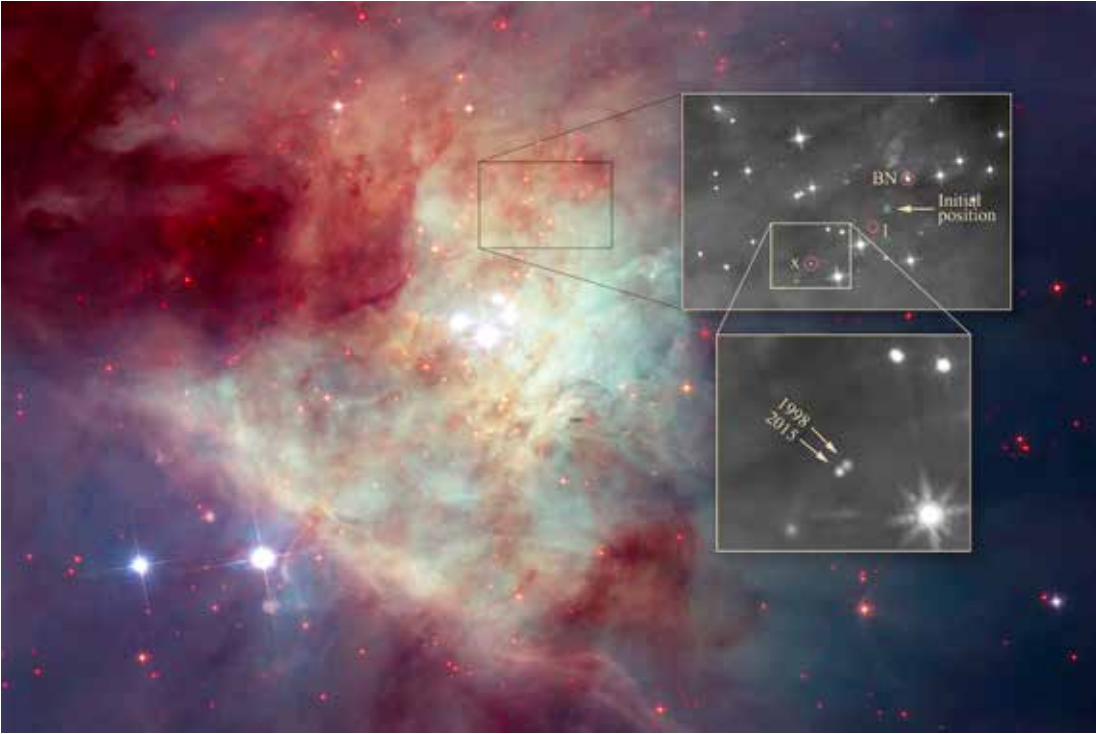
Les astronomes ont profité des capacités dans l'infrarouge proche de la caméra Wide Field 3 du télescope Hubble pour effectuer une recherche de planètes isolées errant dans la nébuleuse d'Orion. Ils ont comparé leurs nouvelles données avec d'anciennes images Hubble prises en 1998 avec la caméra NICMOS (Near Infrared Camera and Multi-Object Spectrometer) du télescope spatial. C'est ainsi qu'ils aperçurent un objet (surnommé « source x ») qui s'était déplacé considérablement en 17 ans. Le mouvement indiquait une vitesse de 200 000 kilomètres par heure, ce qui l'amenait vers l'an 1470 à la même

*Illustration de la désintégration d'un système de quatre étoiles. Deux d'entre elles se rapprochent pour former un couple serré. L'énergie potentielle ainsi libérée fait exploser le groupe.  
(NASA, ESA, Z. Levy/STScI)*

Stellar System Disintegration In Orion Nebula







**Combinaison d'images prises par le télescope spatial Hubble avec les caméras NICMOS et Wide Field 3. Au centre figure l'amas du Trapèze. La boîte située au dessus de l'amas du Trapèze marque la position des trois étoiles hyper-véloces, BN, I et la « source I ». (NASA, ESA, K. Luhman/Penn State University, M. Robberto/STScI)**

position que deux autres étoiles hyper-véloces de la nébuleuse Kleinmann-Low : l'objet Becklin-Neugebauer (BN) et la « source I ».

BN avait été découverte en infrarouge en 1967 mais son grand mouvement propre n'avait été constaté qu'en 1995 grâce à des observations radio qui lui donnaient une vitesse de 100 000 km/h. La source I est si obscurcie par la poussière qu'elle n'est visible qu'en ondes radio. Sa vitesse est de 35 000 km/h.

Il apparaissait ainsi que les trois étoiles avaient été propulsées dans diverses directions à la suite d'un jeu de billard gravitationnel. L'effondrement d'un système multiple conduit à la formation d'une binaire très serrée et à la libération d'une grande quantité d'énergie gravitationnelle qui se manifeste par la fuite des autres étoiles du système. Cela s'accompagne aussi de la projection d'une grande quantité de matière nébulaire. Les images NICMOS montrent d'ailleurs des filaments de matière émanant de la source I.

On peut prédire que la comparaison des images que prendra le futur télescope spatial Webb avec celle de Hubble permettra de découvrir des étoiles hyper-véloces provenant d'autres systèmes de la nébuleuse d'Orion.

## **Rotation stellaire**

*Basé sur un communiqué CNRS*

En observant directement des populations stellaires âgées, les chercheurs ont décrit les conditions qui prévalaient à l'époque à laquelle les étoiles se sont formées dans notre galaxie. Ils ont notamment déterminé l'alignement des axes de rotation des étoiles dans deux amas ouverts, remettant en question les modèles classiques de formation d'étoiles. La plupart des étoiles se sont formées par l'effondrement d'un nuage de gaz géant dans des zones obscurcies par le gaz et les poussières, ce qui les rend difficiles à observer directement. C'est pourquoi la compréhension des mécanismes qui règlent la formation des étoiles représente un grand défi pour l'astrophysique moderne. Avec cette découverte, les scientifiques apportent un éclairage nouveau sur des processus jusque-là sous-estimés qui jouent un rôle important dans l'évolution stellaire et la formation planétaire, ainsi que, de manière générale, dans la formation et l'évolution de notre galaxie. Avec l'avènement de la photométrie spatiale de haute précision, l'astérosismologie a démontré sa capacité à sonder les intérieurs stellaires et à déterminer les paramètres fondamentaux des étoiles. L'équipe a analysé la lumière émise par environ cinquante géantes rouges de masse comprise entre une et deux masses solaires. Ces étoiles, présentes dans deux anciens amas ouverts de la Voie lactée (NGC 6791, âgé de huit milliards d'années, et NGC 6819, âgé de deux milliards d'années) ont été observées pendant quatre ans en continu par le satellite Kepler et présentent des oscillations observables distinctement qui sont similaires à celles du Soleil.

Les milliers de modes d'oscillation présents ont rendu possible la mesure précise de l'orientation de l'axe de rotation de chaque étoile de l'échantillon. Le résultat a été surprenant car presque toutes les étoiles (environ 70 %) présentent des axes de rotation fortement alignés les uns par rapport aux autres et qui pointent vers une direction commune dans le ciel. Normalement, la turbulence générée par les mouvements désordonnés du gaz dans

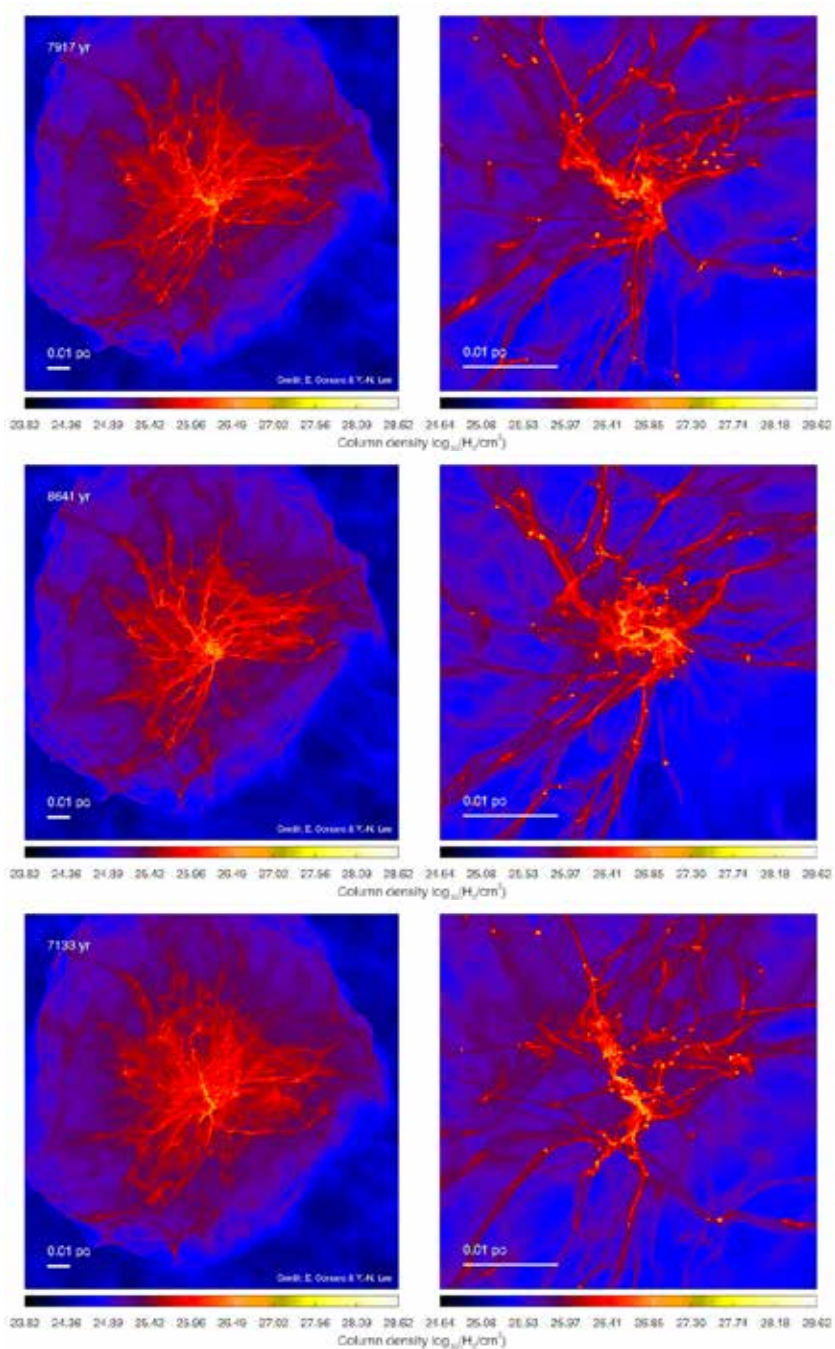
les amas aurait dû distribuer les axes de façon aléatoire. Compte tenu de la morphologie des amas d'étoiles et des distances importantes les séparant dans un amas ouvert, les scientifiques ont conclu que cet alignement des axes de rotation ne peut être dû à des interactions de marée et a nécessairement eu lieu à l'époque de la formation des amas, il y a des milliards d'années. Grâce à des simulations numériques en 3D, les astrophysiciens ont pu reproduire différentes conditions ayant présidé à la formation des étoiles. Ces simulations font notamment varier la quantité d'énergie liée à la rotation initiale du proto-amas par rapport à celle associée aux turbulences. Ils ont pu déterminer avec ces simulations que les axes des étoiles s'alignent efficacement lorsqu'au moins la moitié du bilan d'énergie total des proto-amas est associée à la rotation. Cela montre que les propriétés de la rotation du nuage moléculaire (notamment sa vitesse angulaire globale) ont été efficacement transférées vers les étoiles individuelles se formant à l'intérieur du nuage. En outre, seules les étoiles dont la masse est suffisamment importante (au moins 0,7 fois la masse solaire) peuvent hériter de ces propriétés. Par conséquent, les étoiles moins massives ne possèdent pas cet alignement observé des axes de rotation, car leur processus de formation a été en grande partie dominé par des turbulences qui ont brouillé ce mouvement angulaire.

L'étude du noyau des géantes rouges lointaines a permis ainsi d'éclairer les conditions primordiales de la formation d'étoiles dans des amas stellaires âgés de 8 milliards d'années, quand l'Univers était encore très jeune.

*Aux pages suivantes, une simulation numérique de la fragmentation d'un amas d'étoiles jusqu'à la formation des étoiles (à gauche) avec un zoom sur la partie la plus centrale de l'amas (à droite). Les axes d'inclinaison des étoiles de masses similaires à celles observées par le satellite Kepler (dans l'amas NGC 6791) s'alignent dans cette simulation lorsque l'énergie cinétique du nuage original est comparable à l'énergie turbulente ambiante. (E. Corsaro & Y.N. Lee)*







## Tsunamis martiens

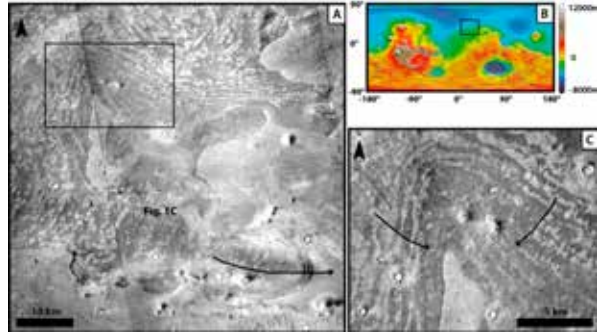
Basé sur un communiqué INSU/CNRS

Mars aurait connu des mega-tsunamis produits par des impacts de météorites dans un océan. Ces dernières années, divers travaux avaient étudié la possibilité qu'un tel événement puisse s'être produit sur Mars, mais aucune équipe n'avait pu identifier les cratères à l'origine de ces tsunamis. C'est maintenant chose faite.

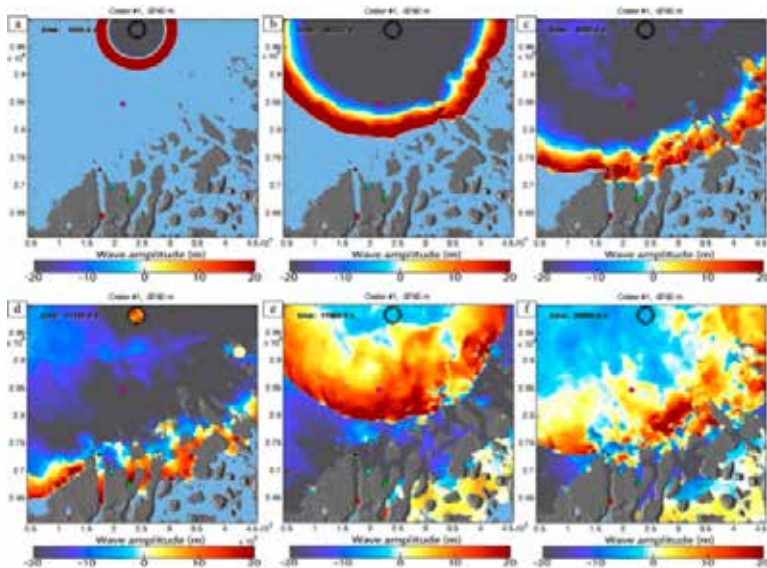
Dans une première étape les chercheurs ont distingué et cartographié des dépôts lobés s'étendant à la limite de supposés paléo-rivages d'un ancien océan (figure ci-contre). Les directions principales de ces coulées de plusieurs kilomètres de large attestent d'une zone source située plus au nord, au beau milieu d'une vaste plaine nommée Vastitas Borealis, qui aurait été anciennement occupée par un océan. Plus surprenant, ces coulées s'étendent sur plus de 150 km à l'intérieur des terres, dépassant même les limites cartographiées des supposés paléo-rivages et remontant les pentes sur plusieurs dizaines de mètres d'altitude. Ces formations ont toutes les caractéristiques des dépôts de tsunamis terrestres. La datation de ces dépôts de tsunamis par comptage de cratères indique la présence d'un océan sur Mars il y a environ 3 milliards d'années.

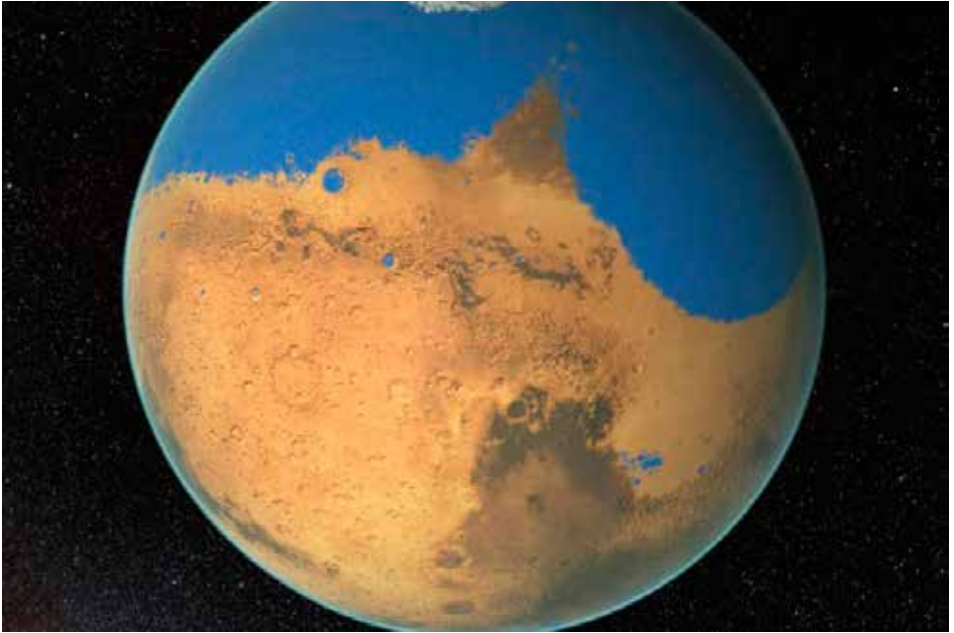
Grâce à un modèle numérique il a été possible de reconstituer précisément les propagations des vagues de

*Modélisation de la propagation des vagues (en jaune et rouge) déclenchées par un impact de 30 km de diamètre (cercle noir) dans un océan (bleu) sur Mars. On notera que les deux vagues arrivent sur les côtes (couleur grise) là où justement s'observent les vastes fronts lobés des coulées. ( Costard et al.)*



**A : Fronts lobés de coulées mises en place lors d'un tsunami dans la région de Vastitas Borealis (B). En C, rides de compression produites en amont d'un obstacle topographique. Les vagues du tsunami ont contourné l'obstacle en remontant les pentes sur plusieurs dizaines de kilomètres. Les flèches noires indiquent le sens de l'écoulement. (Costard et al., 2017 JGR Planets. AGU publications)**





tsunami à partir de trois cratères d'impact identifiés comme s'étant formés dans un océan. Ces coulées aux fronts lobés auraient été déposées par les vagues lorsqu'elles inondèrent les rivages par la propagation d'une ou plusieurs ondes déclenchées par des impacts dans un océan.

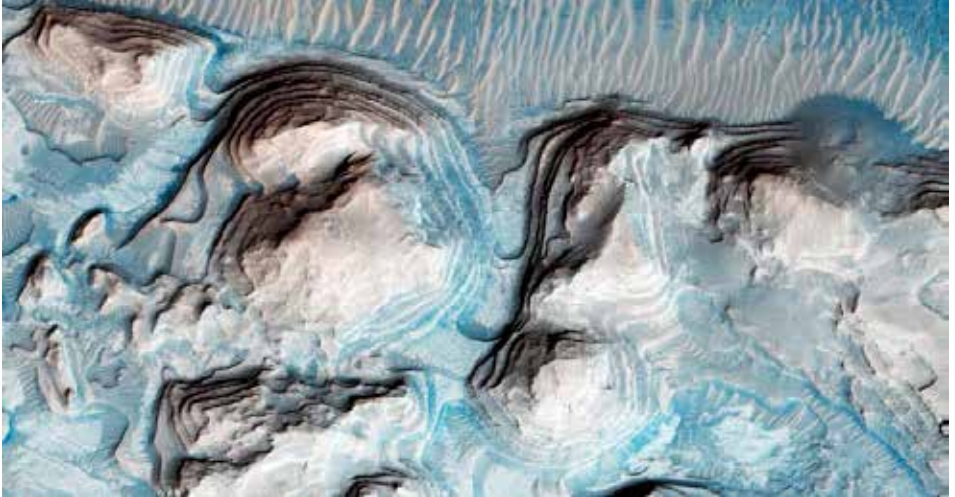
Lors d'un impact de météorite dans un océan, il se forme deux vagues successives : la première produite lors de l'expulsion de l'océan au moment de l'impact et la deuxième produite par le soudain remplissage de l'océan dans la profonde cavité formée par le cratère. Les impacts dans l'océan martien auraient provoqué une onde de choc propageant une vague de 150 m de hauteur à la vitesse de 60 m/s. Les fronts lobés des coulées observés sur les images de la page précédente sont les témoins du passage des vagues successives sur les rivages d'un paléo-océan sur Mars.

La découverte de ces tsunamis sur les paléo-rivages de l'hémisphère Nord de Mars relance le débat de l'existence d'un océan et donc de la stabilité de l'eau liquide sur cette planète.

*Vison d'artiste montrant l'hypothétique océan recouvrant le nord de la planète Mars. Ci-dessous, le cratère Lomonosov. (NASA/GSFC/JPL/MSSS).*







*Un autre site possible d'anciens tsunamis martiens, Arabia Terra. (NASA/JPL)*

## **Planète X ou 9**

La recherche d'une hypothétique neuvième planète (dans la classification actuelle de l'Union Astronomique Internationale, l'UAI) progresse rapidement. Son existence a été postulée sur base de la répartition particulière de certains objets de la ceinture de Kuiper (comme 2012 VP113 et la grosse planète naine Sedna), et les perturbations de l'orbite de Saturne mesurées par Cassini ont précisé cette hypothèse (cf. *Le Ciel*, avril 2016, p. 204 et mars 2016, p. 138). On a même une très vague idée de sa position actuelle dans le ciel et de sa masse, une dizaine de fois celle de la Terre.

La recherche de cette planète a été placée pour une bonne partie dans les mains d'une collaboration citoyenne<sup>1</sup> établie par l'Australian National University (ANU). Des images du ciel austral capturées par le télescope SkyMapper de 130 cm de l'observatoire australien de Siding Spring ont été étudiées par 60 000 volontaires qui ont proposé 5 millions de classification d'objets divers. Parmi ceux-ci, quatre ont été jugés dignes d'intérêt et feront

l'objet d'études plus poussées avec divers télescopes de par le monde afin de déterminer s'ils sont des candidats de bon aloi.

On estime que ce projet citoyen a permis de réaliser en trois jours ce qui aurait demandé quatre années de travail aux scientifiques.

Il n'est pas certain que la planète X soit l'un des quatre candidats. Mais, même si ce n'est pas le cas, les astronomes ont engrangé de précieuses informations. Ils ont entre autres pu établir l'absence de planète équivalente à Neptune à moins de 350 unités astronomiques sur les 90 pour cent du ciel austral.

Ce projet est maintenant clôturé, toutes les données de SkyMapper ayant été analysées, mais la recherche citoyenne de la neuvième planète se poursuit avec une autre collaboration, Backyard Worlds: Planet 9<sup>2</sup>, basée sur des images prises par le télescope spatial infrarouge Wise. Les amateurs ont donc une chance de répéter un exploit qui n'avait pas été réalisé depuis un siècle et demi, découvrir une nouvelle planète du système solaire. Il restera à voir si l'UAI accepterait un tel objet comme vraie planète – éventuellement en alambiquant un peu plus sa définition de la notion de planète.

<sup>1</sup> <https://www.zooniverse.org/projects/skymap/planet-9>

<sup>2</sup> <https://www.zooniverse.org/projects/marckuchner/backyard-worlds-planet-9>

## ***Formation d'étoiles dans les jets de trous noirs***

*Basé sur un communiqué ESO*

Des observations effectuées au moyen du Very Large Telescope de l'ESO (VLT) au Cerro Paranal (Chili) ont révélé la formation d'étoiles au sein de puissants jets de matière issus de trous noirs supermassifs. Ces observations attestent sans conteste de la création d'étoiles dans ce type d'environnement extrême.

Les astronomes ont utilisé les instruments MUSE et X-shooter installés sur le VLT pour effectuer le suivi, en direct, d'une collision entre deux galaxies collectivement baptisées IRAS F23128-5919, et situées à quelque 600 millions d'années-lumière. L'équipe a notamment observé les gigantesques jets issus du trou noir supermassif qui occupe le centre de la galaxie méridionale, et détecté la présence d'étoiles nées au sein même de ces jets

de matière. Selon les observations, les étoiles naissent au sein des jets à un rythme particulièrement soutenu – une trentaine de masses solaires chaque année. Ce taux représente le quart de la formation stellaire caractérisant le système de galaxies en fusion.

Les jets sont propulsés par l'énorme quantité d'énergie produite au cœur même des centres galactiques, connus pour être actifs et turbulents. Des trous noirs supermassifs occupent les centres de la plupart des galaxies. En absorbant de la matière, ils chauffent le

***Vue d'artiste d'une galaxie dont certaines étoiles naissent au sein de puissants jets de matière issus de trous noirs supermassifs et centraux. Les données du VLT de l'ESO sont les premières à attester de la formation d'étoiles dans ce type d'environnement extrême.***  
(ESO/M. Kornmesser)





gaz environnant puis l'expulsent de la galaxie hôte sous l'aspect de vents denses et puissants. Cela se traduit par l'appauvrissement en gaz de la galaxie, ce qui pourrait expliquer la raison pour laquelle certaines galaxies cessent de former de nouvelles étoiles lorsqu'elles vieillissent. Ces jets de matière sont très certainement alimentés par des trous noirs massifs et centraux. Reste la possibilité toutefois qu'ils tirent leur énergie de supernovæ se produisant dans une zone caractérisée par un taux de formation stellaire très élevé.

Longtemps, les astronomes ont réfuté la possibilité que des étoiles puissent se former au sein de ces jets, dans des conditions si extrêmes. À ce jour cependant, personne n'avait encore observé ce processus, s'agissant d'une observation particulièrement difficile. Parce qu'ils attestent, sans ambiguïté aucune, de la création d'étoiles au sein de ces jets, ces nouveaux résultats sont particulièrement enthousiasmants.

Le rayonnement issu des étoiles jeunes a pour effet d'exciter les atomes du gaz environnant, qui se teinte alors d'une coloration particulière. L'extrême sensibilité de l'instrument X-shooter a permis à l'équipe d'écarter les autres sources possibles de ce rayonnement – telles que les collisions au sein même du gaz et le noyau actif de la galaxie.

Les spectres caractéristiques de jeunes populations stellaires montrent des vitesses en accord avec celles présumées d'étoiles nées dans un jet. Ces étoiles se déplacent à des vitesses très élevées et elles s'éloignent du centre galactique comme le feraient des objets emportés dans un courant de matière rapide, ce qui prouve sans équivoque la présence d'une population d'étoiles jeunes au sein du jet de matière.

Ces étoiles sont âgées de quelques dizaines de millions d'années. Une étude préliminaire laisse penser qu'elles sont plus chaudes et plus brillantes que les étoiles formées au sein d'environnements moins extrêmes, comme le disque galactique.

Il est possible que les étoiles qui naissent dans le jet à proximité du centre galactique ralentissent, voire même effectuent un trajet

en sens inverse. Celles en revanche qui se forment à plus grande distance subissent une décélération moins importante, et s'échappent peut-être de la galaxie.

Cette découverte, porteuse d'informations intéressantes, pourrait permettre d'éclaircir quelques énigmes astrophysiques. Ainsi les formes qu'arborent certaines galaxies : les galaxies spirales sont dotées d'une structure en forme de disque au centre de laquelle figure un bulbe stellaire entouré d'un nuage d'étoiles diffus baptisé halo alors que les galaxies elliptiques sont principalement composées de ces éléments sphéroïdaux. Les étoiles éjectées du disque principal pourraient donner lieu à ces caractéristiques galactiques.

Ces étoiles pourraient aussi contribuer à l'enrichissement en éléments lourds de l'espace intergalactique. Il suffirait en effet qu'elles soient expulsées de la galaxie puis qu'elles explosent en supernovæ pour que le milieu intergalactique s'enrichisse en éléments lourds.

Le rayonnement cosmique infrarouge, analogue au célèbre rayonnement diffus cosmologique – qui émet dans le domaine des micro-ondes – est une faible lueur émise dans la zone infrarouge du spectre électromagnétique, et qui semble provenir de toutes les directions de l'espace. Une population d'étoiles éjectées dans l'espace intergalactique pourrait contribuer à cette émission.

Si, comme certaines théories l'envisagent, des étoiles se forment au sein de la plupart des jets galactiques, nous disposerions d'un scénario d'évolution des galaxies totalement nouveau.

## ***Éjection d'un trou noir***

Les astronomes ont découvert un trou noir supermassif qui semble avoir été éjecté du centre d'une galaxie lointaine par le seul pouvoir des ondes gravitationnelles. On avait déjà suspecté des cas de ce genre, mais c'est la première fois qu'il y a d'aussi fortes présomptions. Cet objet détecté par le télescope spatial Hubble pèse plus d'un milliard de masses solaires. En plus d'être le plus probant, ce

serait aussi le plus massif des candidats trous noirs éjectés.

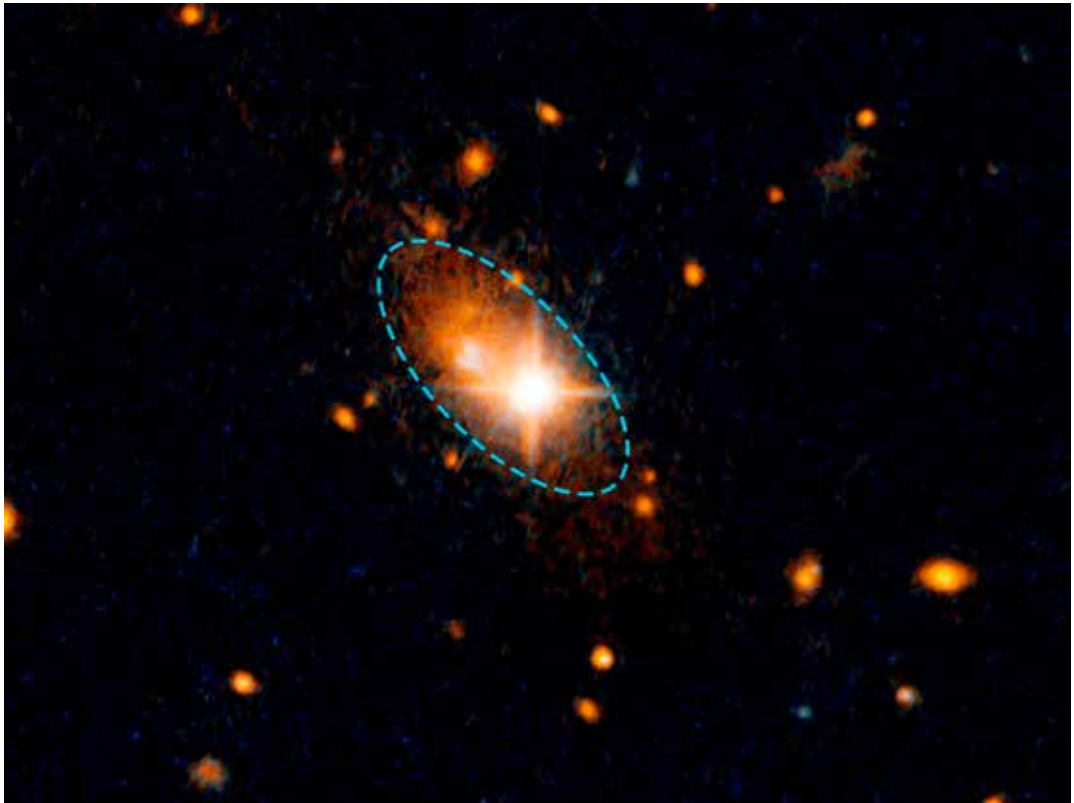
On estime qu'il faut une énergie égale à celle de cent millions de supernovæ pour propulser le trou noir. L'explication la plus plausible est que la fusion de deux trous noirs supermassifs au centre de la galaxie a libéré une décharge d'ondes gravitationnelles qui ont poussé ce trou noir hors de la scène.

Prédites par Albert Einstein, les ondes gravitationnelles peuvent être comparées aux rides concentriques créés dans une mare lorsque l'on y jette une pierre. Ces ondes n'avaient pas été détectées avant l'année passée, lorsque les interféromètres LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) ont observé celles produites par

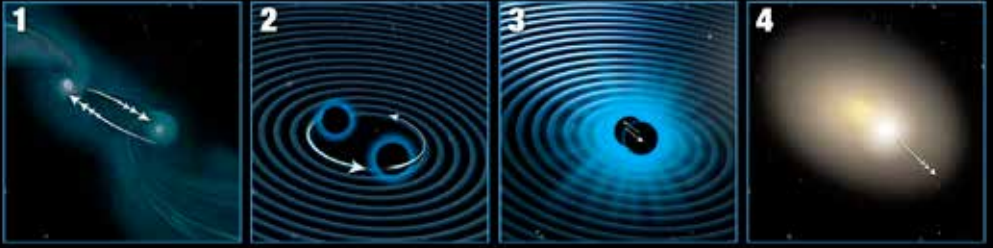
la fusion de deux trous noirs de masses stellaires.

Des images prises par le télescope spatial Hubble dans le cadre d'une recherche de galaxies en collision suggéraient que la galaxie était particulière. 3C186, un quasar brillant, signe d'un trou noir massif, se trouvait loin du centre, à une distance apparente de 35 000 années-lumière. Les mesures spectroscopiques de la vitesse du gaz entourant le trou noir – et

*Le quasar 3C186 en train de fuir sa galaxie. Image obtenue par le télescope spatial Hubble grâce à la caméra Wide Field 3. Elle combine des données dans le visible et l'infrarouge proche. (NASA, ESA, M. Chiaberge/STScI/JHU)*



## Gravitational waves eject black hole from galaxy



donc probablement de celui-ci – donnaient 7,5 millions de kilomètres par heure. À cette allure le quasar quittera la galaxie en vingt millions d’années.

Hubble montrait de faibles traînées de matière suggérant une interaction gravitationnelle entre 3C186 et une autre galaxie qu’il a dû absorber.

Lorsque deux galaxies coalescent, leurs trous noirs s’installent au centre de la galaxie résultante. Ils tournent l’un autour de l’autre en émettant des ondes gravitationnelles, à la façon d’un arroseur rotatif. De l’énergie est ainsi perdue progressivement. Si les trous noirs ne sont pas de même masse, les ondes gravitationnelles seront émises de façon préférentielle dans une direction. Lorsqu’ils finissent pas se rejoindre et fusionner, l’émission d’ondes gravitationnelles cesse. Le trou noir résultant subit un effet de recul dans la direction opposée à celle des ondes les plus intenses et est propulsé comme une fusée.

En fait l’asymétrie dans l’émission des ondes ne dépend pas que de la différence de masse des trous noirs initiaux. Elle est également fonction de l’orientation des axes de rotation avant et après la fusion. C’est la raison pour laquelle de tels objets sont rares.

Si ce scénario est avéré, il s’agit là d’une preuve de la fusion de trous noirs supermassifs. On sait avec certitude grâce à LIGO que les trous noirs stellaires peuvent

*Mécanisme d’expulsion d’un trou noir du centre d’une galaxie par des ondes gravitationnelles.*

*Deux galaxies munies chacune d’un trou noir fusionnent. Les deux trous noirs se rapprochent du centre de la nouvelle galaxie et tournent l’un autour de l’autre. Ils émettent des ondes gravitationnelles et leur séparation diminue.*

*Si les masses et les vitesses de rotation des trous noirs diffèrent, les ondes gravitationnelles sont émises principalement dans une direction (secteur plus brillant du panneau 3). Finalement les trous noirs coalescent et le trou résultant est bouté dans la direction opposée aux ondes. NASA, ESA, A. Feild/STScI*

fusionner, mais le cas des trous noirs supermassifs est plus complexe et encore mal compris.

Une explication alternative de la présence de ce quasar loin du centre de la galaxie est qu’il se trouve par hasard sur la ligne de visée mais plus loin derrière elle. Les astronomes pensent cependant que dans ce cas ils auraient décelé la galaxie-hôte de ce quasar.

Des observations ultérieures avec, entre autres, Hubble et le réseau ALMA, devraient préciser les vitesses du trou noir et de son disque de gaz et permettre de mieux comprendre la nature de ce bizarre objet.