



L'astronomie dans le monde

Étoiles à neutrons

Depuis les années 60 et la découverte des étoiles à neutrons, les astronomes essaient d'évaluer la masse maximale qu'elles peuvent avoir sans s'effondrer en trous noirs. La densité de ces étoiles est énorme et la gravité y est si intense que la pression « de dégénérescence » des neutrons peine à la supporter. Au-delà d'une certaine limite – la fameuse goutte d'eau qui fait déborder le vase – un neutron de trop fait s'écrouler l'édifice. L'étoile ne supporte plus son poids.

On connaît une situation un peu semblable pour les naines blanches. Au-dessus d'une certaine masse critique la pression de dégénérescence électronique ne résiste plus à la gravité. L'étoile explose alors en supernova. Dans ce qui n'est pas éjecté, les électrons et les protons se combinent en neutrons et laissent place à une étoile à neutrons. Cette masse limite (dite de Chandrasekhar) est de l'ordre

*Émission d'ondes gravitationnelles lors de la fusion d'une paire d'étoiles à neutrons.
(Goethe-Universität Frankfurt am Main)*

de 1,44 fois celle du Soleil, ce qui explique pourquoi nombre d'étoiles à neutrons ont des masses de cet ordre. Les naines blanches concentrent cela dans le volume d'une planète comme la nôtre. Leur densité est très élevée ; mais que dire de celle des étoiles à neutrons dont le diamètre est dix mille fois plus petit et le volume mille milliards de fois moindre ? Imaginons le Soleil concentré en une sphère cent mille fois plus petite. Sa densité dépasserait 10^{15} tonnes par mètre cube.

Certaines étoiles à neutrons sont nettement plus massives que 1,44 masse solaire. Par exemple PSR J0348+0432 pèse 2,01 fois autant que le Soleil.

La valeur exacte de la masse maximale que peuvent atteindre les étoiles à neutrons en

l'absence de rotation vient enfin d'être établie. Elle est de 2,16 masses solaires. Pour arriver à ce résultat les astronomes ont combiné des considérations théoriques avec l'observation par LIGO des ondes gravitationnelles émises lors de la fusion de deux étoiles à neutrons (GW170817, cf. *Le Ciel* 79 (2017) 598) et l'observation subséquente des émissions électromagnétiques (la « kilonova »).

Cette valeur a été confirmée indépendamment par d'autres chercheurs, suivant une procédure différente. L'observation d'autres fusions d'étoiles à neutrons et les expériences dans les grands accélérateurs de particules devraient permettre de la préciser davantage.

eBOSS

Le survey eBOSS (Extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey) est le plus grand recensement de galaxies jamais réalisé. Il fait partie de la quatrième phase du survey SDSS (Sloan Digital Sky Survey), un énorme travail d'imagerie et de spectroscopie entrepris au début du millénaire et couvrant principalement le ciel boréal.

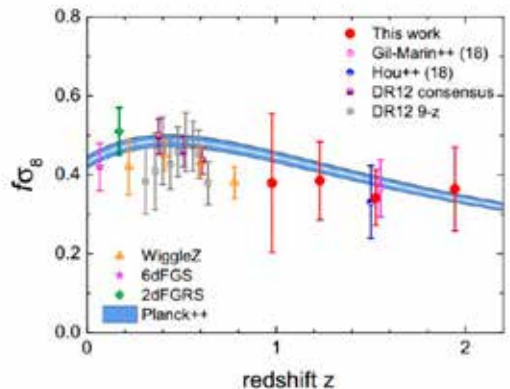
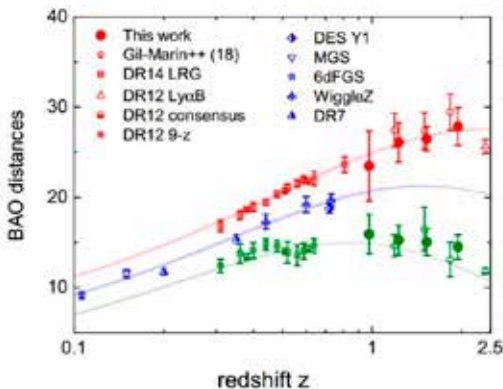
Les premiers résultats publiés par l'équipe d'eBOSS consistent en la mesure des distorsions « dans l'espace des redshifts », ou « espace-redshifts » (RSD), à partir d'observations de quasars dont le décalage vers le rouge

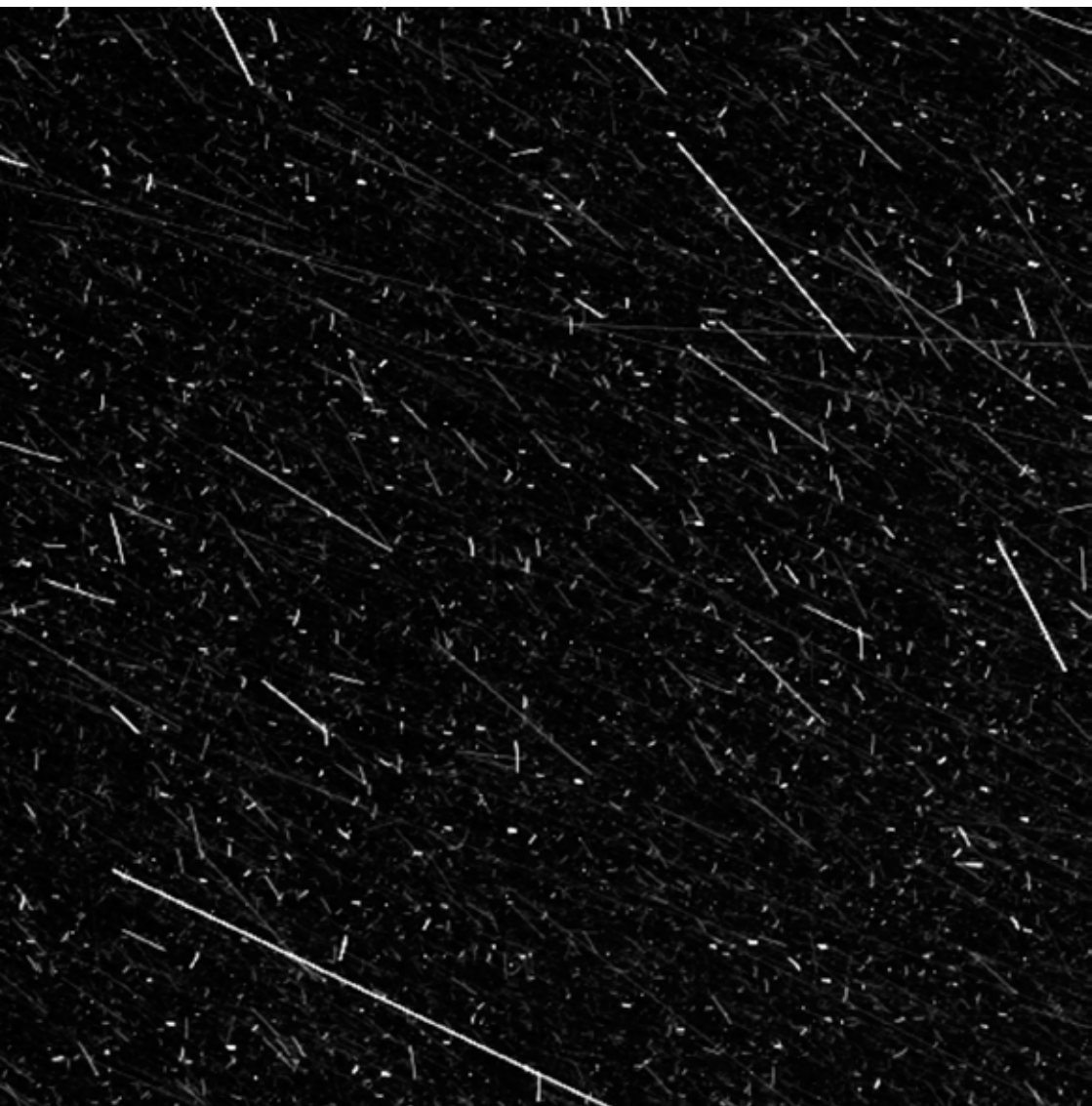
va de 0,8 à 2,2 (ce qui équivaut à des distances de 6,8 à 10,5 milliards d'années-lumière). C'est la première fois que des quasars sont utilisés pour décrypter la croissance du cosmos.

La RSD affecte la distribution tridimensionnelle des objets en raison des effets du champ gravitationnel local. C'est l'un des principaux traceurs de la gravité à l'échelle cosmique. Les premières données observationnelles de RSD ont été obtenues dès 2001 grâce aux amas de galaxies proches. Avec les mesures d'eBOSS utilisant des quasars lointains, on a maintenant des données sur l'Univers lorsqu'il n'avait que le tiers de son âge actuel.

Ces résultats sont un nouveau succès pour eBOSS, après les premières mesures des oscillations acoustiques baryoniques (BAO) réalisées l'an passé. Ils montrent l'intérêt des quasars pour les études cosmologiques et augurent bien des études qui devraient aboutir prochainement, dès 2019. Celles-ci doivent utiliser l'échantillon complet d'eBOSS et inclure, outre les quasars, les galaxies rouges lumineuses (LRG).

Les mesures eBOSS des oscillations baryoniques acoustiques (BAO) et des RSD sont indiquées sur ces deux diagrammes par des points rouges et comparées avec les estimations obtenues par d'autres surveys de galaxies.
(ZHAO, et al.)





Comète 67P

Cinq mois après son passage au périhélie, la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko était encore fort active et son environnement très chaotique comme le montre l'image ci-dessus prise par la sonde Rosetta de l'ESA. Durant la pose de 146 secondes,

Image prise par la sonde Rosetta le 21 janvier 2016 à 79 kilomètres du noyau de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko. Pose de 146 secondes. (ESA/Rosetta/MPS for OSIRIS Team MPS/UPD/LAM/IAA/SSO/INTA/UPM/DASP/IDA)

une multitude de grains de poussières éjectés par le dégazage du noyau ont laissé des traces évoquant une pluie désordonnée d'étoiles filantes. La sonde était alors proche du noyau, à 79 kilomètres seulement.

Les grains représentaient un risque pour Rosetta. Outre les dégâts possibles qu'auraient représentés des impacts, le système de navigation pouvait être malmené. En effet, les capteurs calculaient l'orientation de la sonde en prenant des étoiles comme repères. Les poussières brillantes pouvaient alors confondre le système et provoquer des erreurs jusqu'à parfois mettre l'engin en mode de sécurité, empêchant temporairement les opérations.

Malgré ces dangers les poussières présentaient un grand intérêt scientifique. Trois des instruments de Rosetta étaient consacrés à leur étude. Ils ont analysé des dizaines de milliers de particules, déterminant leur composition, leur masse, leur vitesse, leur structure.

ExTrA

Basé sur un communiqué ESO

ExTra (Exoplanètes en Transits et leurs Atmosphères) est un trio de télescopes qui viennent d'être installés à l'observatoire de l'ESO de La Silla et ont effectué leurs premières observations avec succès. ExTra est conçu pour détecter la présence de planètes autour de naines rouges proches et étudier leurs propriétés. Les télescopes sont télécommandés depuis Grenoble.

Pour détecter et étudier les exoplanètes, ExTra utilise trois télescopes de 0,6 mètre de diamètre qui mesurent à intervalles réguliers

Vue nocturne des trois dômes d'ExTrA sous un ciel spectaculaire où se détachent les Pléiades, la constellation d'Orion et Sirius.
(ESO/Petr Horálek)





de nombreuses étoiles de type naine rouge et scrutent la moindre diminution de luminosité pouvant résulter du transit d'une planète devant le disque d'une étoile, l'obscurcissant légèrement.

La comparaison de la brillance de l'étoile étudiée avec celle d'autres étoiles de référence (« photométrie différentielle ») permet de détecter d'infimes variations de lumière. Les trois télescopes ExTrA collectent la lumière en provenance de l'étoile cible et de quatre étoiles de comparaison. Cette lumière est ensuite transmise par fibres optiques à un spectrographe multi-objets. Cette approche novatrice qui consiste en l'ajout d'informations spectroscopiques à la traditionnelle photométrie permet d'atténuer l'effet perturbateur de l'atmosphère terrestre, ainsi que les effets générés par les instruments et les détecteurs – augmentant par là même le degré de précision atteint.

***L'un des trois télescopes ExTrA.
(ESO/Petr Horálek)***

Depuis le sol, il est effectivement difficile d'effectuer des mesures suffisamment précises pour détecter de petites planètes du type de la Terre. L'adoption d'une approche qui repose sur l'utilisation de données dans différents domaines de longueurs d'onde, permet de pallier certaines de ces limitations.

Le site de la Silla offre d'excellentes conditions atmosphériques. La sécheresse de l'atmosphère et l'absence de pollution atmosphérique sont favorables aux observations dans le domaine de longueurs d'onde choisi pour ExTra, le proche infrarouge.

Une planète en transit bloque une proportion d'autant plus grande de la lumière de l'étoile que celle-ci est petite. ExTrA se focalise donc sur un type particulier de petites étoiles, les naines rouges de classe M, de faible luminosité mais qui fort heureusement

pullulent dans la Voie lactée. On peut donc en observer beaucoup de très proches. Ces étoiles sont censées abriter de nombreuses planètes de type terrestre, ce qui en fait des cibles de choix pour les astronomes souhaitant découvrir et étudier des mondes susceptibles d'abriter la vie.

Proxima Centauri, l'étoile la plus proche du Soleil, est une naine de classe M autour de laquelle a été découverte une planète dont la masse avoisine celle de la Terre. Le système « liégeois » de Trappist 1 en est un autre exemple encore plus spectaculaire.

Si découvrir de nouvelles Terres est l'un des deux principaux objectifs d'ExTrA, les télescopes étudieront également dans le détail ces planètes pour déterminer leurs propriétés ainsi que leur composition et établir leur degré de similitude avec la Terre.

ExTrA permettra également d'aborder certaines questions fondamentales relatives aux planètes peuplant notre galaxie. Les astronomes espèrent ainsi pouvoir évaluer la proportion de ce type de planètes, le comportement des systèmes multi-planétaires, et les types d'environnements propices à leur formation.

Un des dômes d'ExTrA cache un de ses frères sur le Cerro La Silla. En arrière-plan la coupole qui a abrité le GPO puis le Marli et celle du télescope danois d'1 m 54. (ESO/Petr Horálek)



Métal météoritique

Basé sur un communiqué CNRS

Si la présence d'objets en fer dès l'âge du bronze peut surprendre, leur origine est encore plus extraordinaire : leur métal provient de météorites. La chose était connue, mais jusqu'à présent la communauté scientifique ne parvenait pas à déterminer si cela concernait la majorité des objets en fer de l'époque, ou seulement quelques exceptions. De nouveaux travaux ont montré que le fer utilisé à l'âge du bronze est systématiquement météoritique. Cette pratique a disparu à l'âge du fer.

L'âge du fer commence en Anatolie et dans le Caucase autour de 1 200 ans avant notre ère. Mais près de 2 000 ans plus tôt, diverses cultures façonnent déjà des objets en fer. Ces artefacts restent extrêmement rares et bénéficient toujours d'un grand prestige. Comment expliquer leur valeur alors que les minerais de fer sont très abondants à la surface de la Terre ? Des premiers travaux ont montré que certains avaient été conçus avec du fer provenant de météorites, ce qui a poussé les chercheurs à se demander quelle part de ces vestiges avaient une origine extraterrestre. De nouvelles analyses non destructives ont été effectuées avec un spectromètre de fluorescence X portable permettant l'analyse chimique des échantillons. Le corpus d'objets comprend des perles en fer retrouvées à Gerzeh (Égypte, -3200), une dague découverte à Alaca Höyük (Turquie, -2500), un pendentif d'Umm el Marra (Syrie, -2300), une hache d'Ugarit (Syrie, -1400) et plusieurs autres de la dynastie

Shang (Chine, -1400), ou encore la dague, le bracelet et l'appui-tête de Toutankhamon (Égypte, -1350).

Résultat : tous ces artefacts en fer de l'âge du bronze sont bien d'origine météoritique. Rappelons que lors de la formation de gros astres tels que notre planète, le nickel migre presque entièrement vers le noyau de fer liquide. Ce métal est donc rare en surface. Certaines météorites naissent en revanche de la destruction d'astres et, si elles proviennent du cœur de ces derniers, elles sont principalement composées de fer avec une forte teneur en nickel et en cobalt. C'est ce qui permet de distinguer la source du fer. Il se trouve également que, dans les météorites, le fer est à l'état de métal et peut être utilisé tel quel par le forgeron, contrairement aux minerais terrestres qui sont transformés en métal par une opération de réduction consistant à ôter l'oxygène qu'ils contiennent. Le fer extraterrestre n'avait pas besoin d'être réduit dans les fourneaux de l'âge du bronze.

L'invention de la technique permettant d'ôter l'oxygène des minerais de fer a ensuite ouvert le véritable âge du fer et les rarissimes métaux extraterrestres ont été entièrement délaissés au profit de minerais beaucoup plus courants et économiques.

Trou noir dans NGC3201

Basé sur un communiqué ESO

Grâce à l'instrument MUSE qui équipe le Very Large Telescope de l'ESO au Chili, les astronomes ont découvert dans l'amas NGC 3201 une étoile qui semble orbiter autour d'un trou noir invisible. C'est le premier trou noir inactif de masse stellaire découvert dans un amas globulaire et le premier trou noir détecté au moyen des seuls effets de son attraction gravitationnelle.

Les amas globulaires sont de vastes sphères constituées de dizaines de milliers d'étoiles et qui tournent autour de la plupart des galaxies. Ils figurent parmi les systèmes stellaires les plus âgés de l'Univers : leur formation est contemporaine des débuts de la croissance et de l'évolution galactiques. À ce jour, quelque 150 amas globulaires ont été identifiés au sein de la Voie lactée.

L'un de ces amas, NGC 3201, situé dans la constellation australe de Vela (Les Voiles), a fait l'objet d'une étude au moyen de l'instrument MUSE qui équipe le Very Large

Telescope de l'ESO. Cet instrument offre aux astronomes la possibilité de mesurer simultanément les mouvements de milliers d'étoiles. Les observations ont été menées dans le cadre d'un vaste sondage de 25 amas globulaires situés en périphérie de la Voie lactée. Ce sondage fournira à terme aux astronomes les spectres des 600 à 27 000 étoiles peuplant chaque amas. L'étude inclut l'analyse de la « vitesse radiale » des étoiles individuelles – la vitesse à laquelle elles se déplacent en direction ou à l'opposé de la Terre, le long de la ligne de visée de l'observateur. Les mesures de vitesses radiales permettent de déterminer les orbites des étoiles ainsi que les propriétés de tout objet massif autour duquel elles sont susceptibles de tourner.

L'étude a mis en évidence l'étrange comportement d'une des étoiles : sa vitesse radiale varie de plusieurs centaines de milliers de kilomètres par heure selon une périodicité de 167

Vue d'artiste du système du trou noir découvert dans l'amas globulaire NGC 3201. (ESO/L. Calçada/spaceengine.org)





jours. Elle semble orbiter autour de quelque chose d'invisible, dont la masse dépasse quatre masses solaires. Cela ne peut être qu'un trou noir, qui est donc découvert en observant les seuls effets de son attraction gravitationnelle. L'observation de ses propriétés a permis de fixer la masse de l'étoile à 0,8 masse solaire, et la masse du trou noir à 4,36 masses solaires.

L'objet sombre de ce système binaire ne peut faire l'objet d'une observation directe. En conséquence, d'autres explications, beaucoup moins pertinentes toutefois, peuvent être avan-

***Image prise par le télescope spatial Hubble du cœur de l'amas globulaire NGC 3201 dans Vela.
(ESA/NASA)***

cées. Ce système pourrait par exemple être assimilé à un système stellaire triple constitué de deux étoiles à neutrons étroitement liées l'une à l'autre, autour desquelles orbite l'étoile observée. Ce scénario présuppose que chaque étoile à neutrons a une masse plus que double de celle du Soleil – soit le maximum possible

pour des étoiles à neutrons (cf. page 136). Un tel système binaire n'a encore jamais été observé.

Bien qu'importante, la relation unissant les trous noirs aux amas globulaires demeure mystérieuse. Leurs masses élevées et leurs âges avancés laissent supposer que ces amas ont produit un grand nombre de trous noirs de masse stellaire – vestiges de l'explosion puis de l'effondrement d'étoiles massives tout au long de la durée de vie de l'amas.

En l'absence de formation continue d'étoiles, comme c'est le cas dans les amas globulaires, les trous noirs de masse stellaire deviennent rapidement les objets les plus massifs. En règle générale, les trous noirs de masse stellaire des amas globulaires sont quatre fois plus massifs que les étoiles périphériques. Des théories récentes stipulent que les trous noirs constituent un noyau dense à l'intérieur de

l'amas, qui tend à se dissocier du reste de la matière globulaire. Des mouvements au centre de l'amas sont ensuite supposés éjecter la majorité des trous noirs et seuls quelques-uns d'entre eux survivraient pendant des milliards d'années.

Les trous noirs de masse stellaire – ou collapsars – se forment lorsque des étoiles massives meurent, s'effondrant sous leur propre poids et explosant sous la forme de

Image couleur composite de l'amas globulaire NGC 3201 obtenue au moyen de l'instrument WFI qui équipe le télescope ESO/MPG de 2,2 mètres installé à La Silla. Les données ont été obtenues dans le cadre de l'ESO Imaging Survey (EIS), un sondage public mené par l'ESO et les états membres, en vue de préparer la première lumière du VLT.
(ESO)





puissantes hypernovæ. En résulte un trou noir doté d'une masse sensiblement inférieure à celle de l'ancienne étoile, comprise entre plusieurs masses solaires et plusieurs dizaines de masses solaires.

Les récentes détections de sources de rayonnements radio et X au sein des amas globulaires, tout comme la détection d'ondes gravitationnelles résultant de la fusion de deux trous noirs de masse stellaire, suggèrent que ces trous noirs de modestes dimensions pourraient être bien plus nombreux qu'on ne le pensait dans les amas globulaires. Récemment encore, on supposait que la plupart des trous

Le champ général de l'amas globulaire NGC 3201. Image créée à partir de clichés du Digitized Sky Survey 2. (Digitized Sky Survey 2; Davide De Martin)

noirs disparaissaient des amas globulaires en un laps de temps très court, et que de tels systèmes n'existaient même pas. Ce n'est manifestement pas le cas. La nouvelle découverte permet d'affiner notre compréhension de la formation des amas globulaires ainsi que l'évolution des trous noirs et des systèmes binaires – ce qui est essentiel pour la compréhension des sources d'ondes gravitationnelles.

Avis de tempête sur les trous noirs

Basé sur un communiqué CNRS-INSU

L'accrétion de matière sur un trou noir libère une quantité phénoménale d'énergie, à condition que la matière soit effectivement transportée vers le trou noir au lieu de tourner en rond par conservation de son moment cinétique. L'étude des processus de transport dans les disques d'accrétion constitue donc un ingrédient essentiel pour comprendre comment les trous noirs libèrent et injectent de l'énergie dans leur environnement.

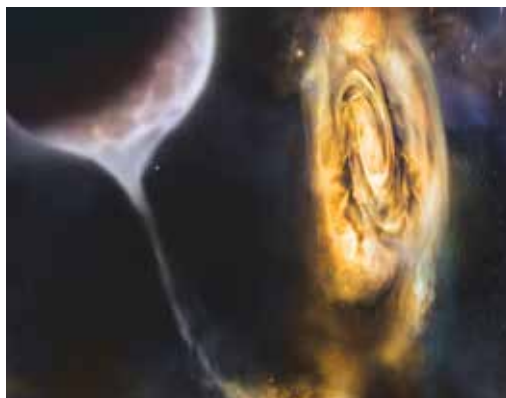
L'observation du rayonnement des étoiles binaires X permet de contraindre ces processus. Dans une étoile binaire X, un trou noir de masse stellaire résultant de l'effondrement d'une étoile massive en fin de vie accrète la matière qui lui est cédée par son compagnon – une étoile normale suffisamment proche du trou noir pour ressentir son attraction gravitationnelle. Les observations en rayons X montrent que le disque d'accrétion autour du trou noir est le siège d'éruptions intenses suivies de phases de dormance. Les éruptions durent de quelques semaines à quelques mois pendant lesquels certaines binaires X peuvent devenir les objets les plus brillants du ciel X. Elles sont par contre quasi imperceptibles lors de la phase de repos qui peut durer plusieurs dizaines d'années.

Le rayonnement X trahit le flux de matière accreté par le trou noir. L'analyse des variations du rayonnement X apporte donc un éclairage sur les mécanismes de transport de matière dans ces disques.

Les chercheurs ont réuni dans une base de données les mesures provenant de plusieurs observatoires X pour reconstruire aussi complètement que possible les variations de ce rayonnement lors des éruptions. Ils ont ensuite testé un modèle d'éruption qui permet de relier la chute de la luminosité X durant l'éruption à un paramètre fondamen-

tal de la physique de l'accrétion, le paramètre « alpha ». Ce paramètre mesure l'efficacité du transport dans le disque. Les valeurs mesurées dans d'autres systèmes comportant des disques d'accrétion indiquent une valeur allant de 0,1 à 0,2, ce qui concorde avec les études théoriques qui expliquent ce transport par la turbulence générée par un champ magnétique faible cisailé par le mouvement de la matière dans le disque. Une approche statistique a permis d'ajuster le modèle théorique aux courbes de lumière d'une douzaine de binaires X et de mesurer, pour la première fois et de manière fiable, la valeur d'alpha dans ces systèmes : il varie entre 0,2 et 1, bien au-delà de ce qui avait été mesuré jusqu'à présent.

Une accrétion aussi rapide ne peut être expliquée que par la perte d'une fraction substantielle de la matière du système ou, si le transport turbulent est amplifié, par la présence d'un champ magnétique à grande échelle qui génère un vent et emporte une partie de la matière hors du système. La signature de tels vents est présente dans les spectres X obtenus à certains stades de l'éruption. Les résultats présentés ici établissent, par une méthode indépendante, que ces vents sont continuellement présents lors de l'éruption et que le mécanisme de perte de masse joue un rôle aussi fondamental que la turbulence du plasma dans la dynamique des disques d'accrétion. L'énergie mécanique des vents pourrait ainsi ré-injecter dans l'environnement une part significative de l'énergie libérée autour du trou noir.



***Représentation de vents puissants
régulant l'accrétion de matière sur les
trous noirs de masse stellaire.
(NASA/Swift/Sonoma State University,
A. Simonnet)***

Rayons cosmiques

L'origine des particules de très haute énergie a toujours été un mystère. Un nouveau modèle théorique donne une explication commune aux neutrinos, aux photons et aux autres rayons cosmiques (protons, etc.) les plus énergétiques. Ces particules proviendraient directement ou indirectement des noyaux de galaxies actives, et seraient donc *in fine* le produit des trous noirs supermassifs.

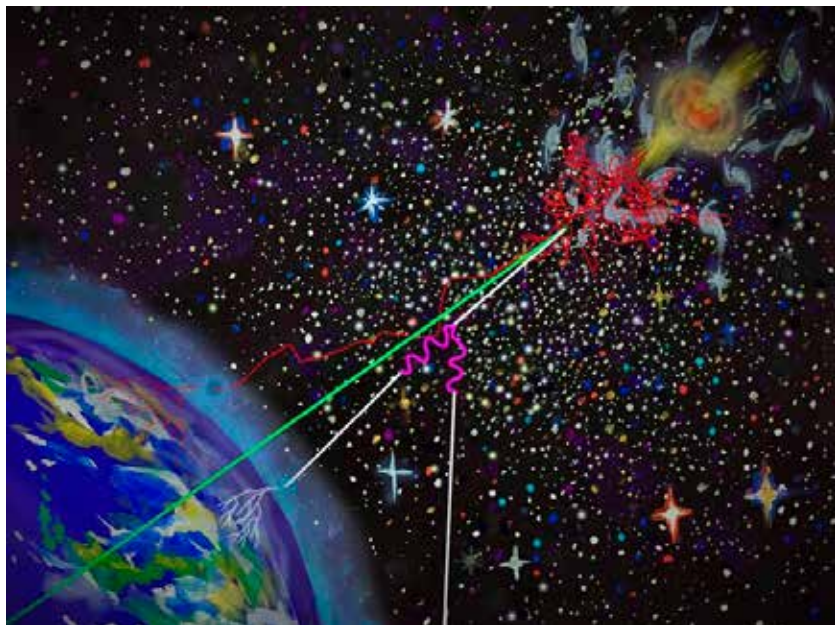
Les neutrinos et les rayons gamma seraient produits lors des collisions subies par les particules accélérées dans les jets des galaxies actives et s'échappant par les gigantesques lobes que l'on peut observer en ondes radio. La modélisation des interactions avec le gaz et les champs magnétiques dans les amas de galaxies et dans l'espace intergalactique reproduit bien le spectre et la composition observée des rayons cosmiques de très haute énergie. Elle explique aussi le fond cosmique diffus de rayons gamma.

Les neutrinos sont des particules qui n'interagissent quasiment pas avec la matière. Des neutrinos de très haute énergie, des

dizaines de millions de méga-electronvolts, sont détectés par l'expérience IceCube en Antarctique. Dans le domaine électromagnétique, les photons gamma les plus durs, des milliards de fois plus énergétiques que la lumière visible, ont été observés avec le télescope spatial Fermi ainsi que par des observatoires au sol qui enregistrent les cascades d'interactions qu'ils produisent dans l'atmosphère. Des particules cosmiques comme des protons ou d'autres noyaux ont été détectées depuis le sol dans les mêmes gammes d'énergie mais aussi avec des énergies encore bien plus grandes se mesurant en dizaines de milliards de milliards d'électronvolts (avec un record actuel de l'ordre 3×10^{20} eV, soit près de 50 Joules).

Vue d'artiste d'un gigantesque réservoir de rayons cosmiques accélérés par les jets d'un trou noir supermassif et piégés par l'environnement magnétique. Des neutrinos et des rayons gamma sont produits par suite des interactions dans ce réservoir et ultérieurement dans l'espace intergalactique.

(Kanoko Horio/Eberly College of Science)



GJ436

Basé sur un communiqué UNIGE

Dans la représentation la plus simple, les planètes d'un système planétaire tournent en rond dans le plan équatorial de leur étoile. Les axes de rotation de l'étoile et des orbites planétaires sont alignés, donnant l'impression d'un système bien ordonné. Mais la nature est capricieuse, comme vient de le constater une équipe internationale qui a détecté un système planétaire totalement chamboulé.

GJ436 est une étoile qui a déjà fait couler beaucoup d'encre car elle possède une planète – GJ436b, surnommée la planète chevelue – qui s'évapore comme une comète. Dans une étude récente, les astronomes ont montré qu'en plus de sa chevelure, la planète GJ436b a une orbite très spéciale : elle est « polaire ». Au lieu de tourner dans le plan équatorial de l'étoile, la planète passe quasiment au-dessus des pôles.

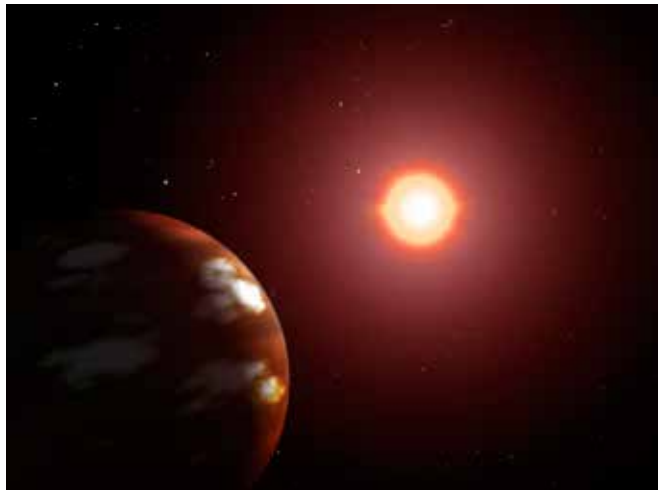
L'inclinaison orbitale de cette planète grosse comme quatre fois la Terre est la dernière pièce d'un puzzle qui laisse perplexes les astronomes depuis dix ans : contrairement aux planètes du Système solaire dont les orbites forment presque des cercles, celle de GJ436 est une ellipse très excentrique, c'est-à-dire que sa distance à l'étoile n'est pas la même en tout point de son orbite. Elle subit d'énormes forces de marée car elle est incroyablement proche de son étoile, à peine 3% de la distance Terre-Soleil. L'étoile est une naine rouge dont la durée de vie est très longue, les forces de marée qu'elle induit devraient depuis le temps avoir circularisé l'orbite de la planète, or ce n'est pas le cas.

Les architectures orbitales des systèmes planétaires nous renseignent sur la manière dont ils se sont formés et ont évolué. Une planète perturbée par le passage d'une étoile proche ou l'existence d'autres planètes massives en garde la trace dans son orbite.

Même si on a déjà vu des orbites planétaires non alignées, on n'en comprend pas forcément bien l'origine, d'autant plus qu'ici c'est la première fois que l'on mesure l'architecture d'un système autour d'une naine rouge. L'existence d'une planète perturbatrice incon nue, plus massive et plus lointaine, expliquerait pourquoi GJ436b ne tourne pas rond : si c'est le cas, alors les calculs indiquent que non seulement la planète ne tourne pas en rond, mais qu'elle devrait se trouver sur une orbite fortement inclinée. C'est exactement ce que l'on vient de mesurer.

Ces mêmes calculs prédisent également que la planète n'a pas toujours été aussi proche de son étoile, mais s'en serait rapprochée récemment (à l'échelle cosmique). Ainsi, la « planète qui s'évapore » ne se serait pas toujours évaporée, mais aurait été poussée vers l'étoile par la gravité d'une compagne invisible. La chasse continue : il ne reste plus qu'à identifier la planète mystérieuse qui a chamboulé ce système planétaire.

Vue d'artiste de Gliese 436 b en orbite autour de son étoile. (NASA)



Eau sur Mars

L'orbiter martien MRO (Mars Reconnaissance Orbiter) a montré huit dépôts souterrains de glace exposés au flanc de falaises abruptes. Ces escarpements dont les pentes atteignent jusqu'à 55° révèlent de nouvelles informations sur des strates de glace qui avaient déjà été détectées aux latitudes moyennes de Mars. On sait en effet qu'il y a de la glace à faible profondeur sous un tiers de la surface de Mars. Elle avait été décelée par les spectromètres à neutrons de Mars Odyssey, par les radars du MRO et par l'orbiter Mars Express de l'ESA. Les impacts les plus récents en montrent aussi la trace et la sonde Phœnix l'avait analysée à la latitude de 68°.

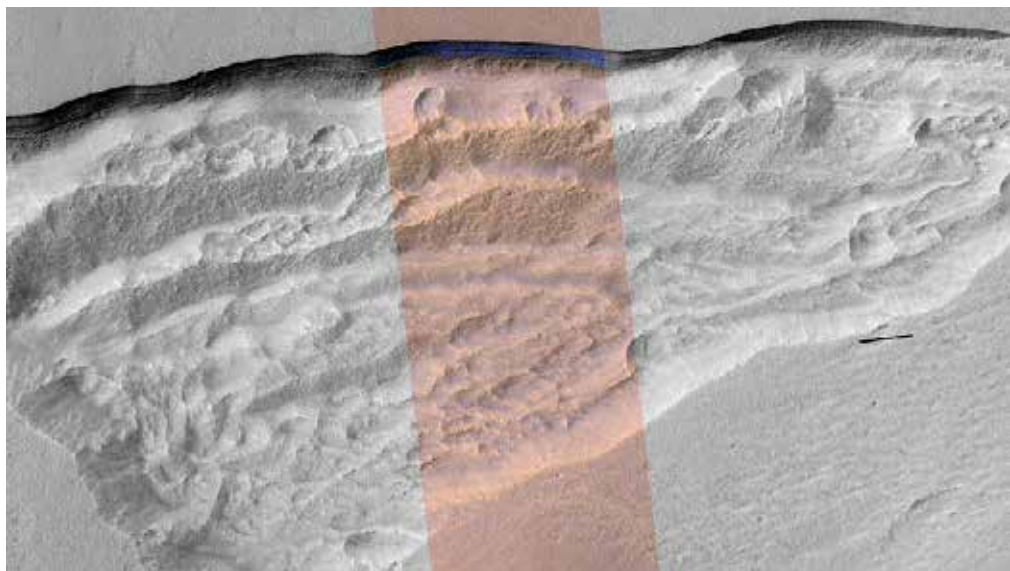
Ces sections nous offrent une vue détaillée en trois dimensions. Il s'agit probablement de très anciens dépôts de neige relativement pure recouverts d'un ou deux mètres d'un mélange de poussières et de roches cimentées par de la glace.

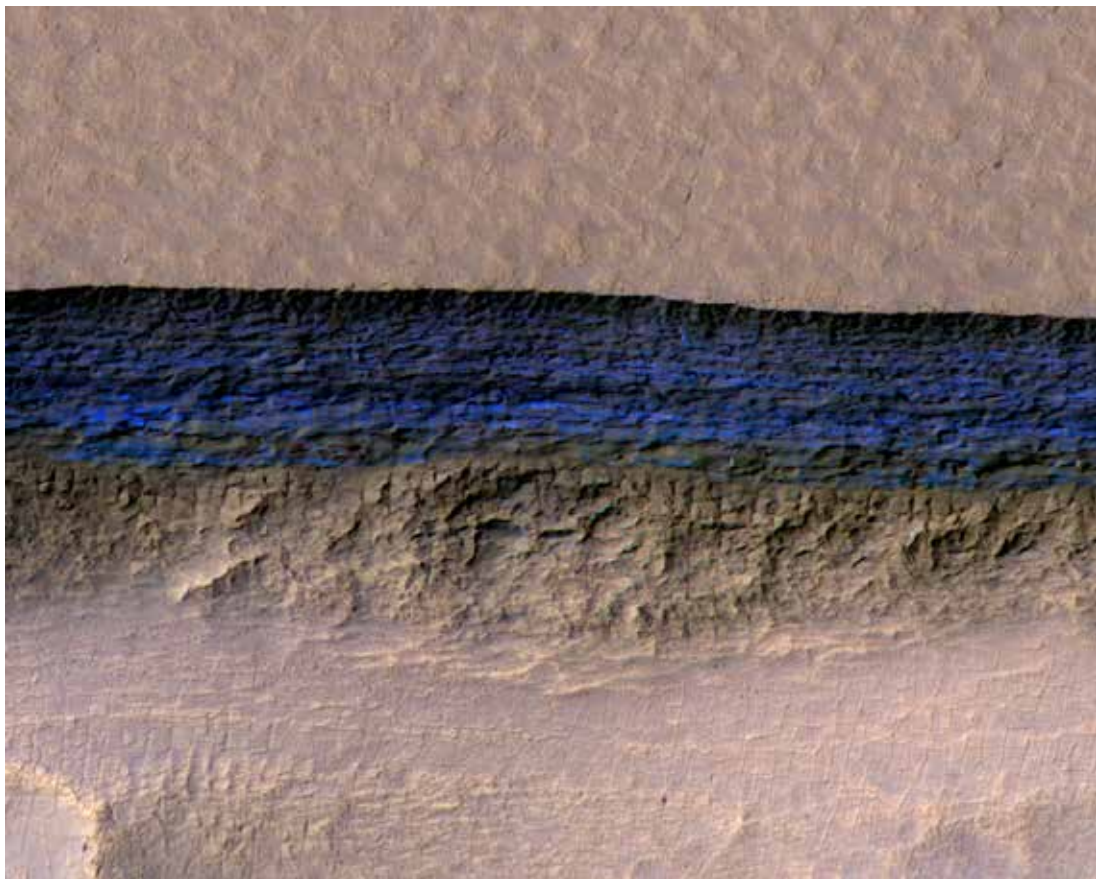
La glace nous donne des clés pour comprendre le climat de la Planète rouge. Tels les anneaux des arbres en dendrochronologie, les couches de glace enregistrent les variations du climat. L'inclinaison de l'axe de rotation

de Mars varie beaucoup plus fort que pour la Terre, même si à l'heure actuelle les deux axes sont inclinés à peu près d'un même angle. Les contrastes entre saisons peuvent devenir beaucoup plus marqués. Quand l'inclinaison est très grande, de la glace peut s'accumuler jusqu'aux latitudes moyennes. Ces variations de la proportion glace/poussière au cours des âges doivent se refléter dans la stratigraphie. Les falaises de glace peuvent donc nous apprendre une partie de l'histoire de l'eau sur la Planète rouge : où va-t-elle, comment s'accumule-t-elle, quand recule-t-elle ?

À l'évidence, ces escarpements de glace constitueront un objectif de choix pour de futures missions d'exploration. L'accessibilité de réserves d'eau à des latitudes plus clémentes que les pôles serait aussi d'un grand intérêt pour l'approvisionnement d'astronautes.

Au nord d'une dépression dans le sol de Mars, une falaise abrupte expose une épaisse couche souterraine de glace. L'image a été obtenue par la caméra HiRISE du MRO. La partie centrale est vue en couleurs augmentées, les zones latérales sont en niveaux de gris. (NASA/JPL-Caltech/UA/USGS)





Les falaises en question ont été localisées et étudiées avec l'expérience HiRISE (High Resolution Imaging Science Experiment) du MRO. Elles se trouvent dans les deux hémisphères à des latitudes de 55° à 58° . On ne sait pas encore comment elles se sont formées mais, une fois exposée à l'atmosphère martienne, la glace se sublime et les fractures s'élargissent.

Quand les observations radar du MRO avaient montré la présence de couches souterraines de glace, l'estimation de leur profondeur était très vague, moins d'une dizaine de mètres. Les observations de cratères récents et les mesures par spectrométrie de neutrons suggéraient quant à elles une profondeur d'un

La glace apparaît en bleu sur cette image en couleurs augmentées prise par HiRISE. Le champ mesure 500 mètres de large. L'escarpement montre un dénivelé de 130 mètres par rapport à la plaine que l'on voit en haut de l'image. (NASA/JPL-Caltech/UA/USGS)

ou deux mètres par endroits, ce que confirment les nouveaux résultats.

Ces résultats ont bénéficié de l'utilisation coordonnée de plusieurs instruments des orbiters martiens, ainsi que de leur exceptionnelle longévité : plus de onze ans pour MRO et de seize pour Odyssey. Ce n'est pas fini, et d'autres instruments devraient prendre le relais et pousser encore plus loin les investigations.

Matière sombre

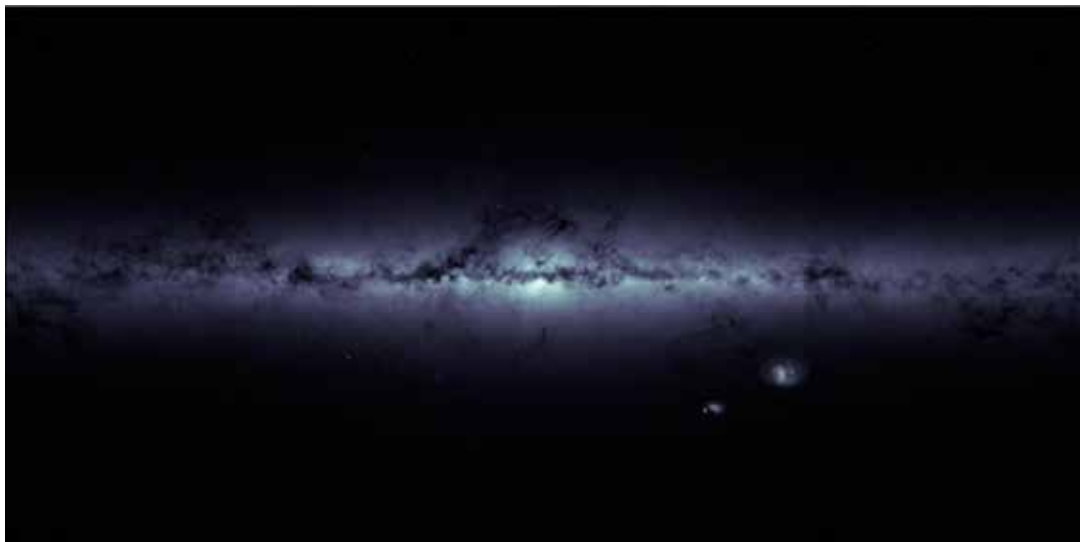
Les propriétés de la matière « sombre », ou « noire », restent mystérieuses. Les astronomes aimeraient connaître ses mouvements et, par exemple, sa vitesse relative par rapport à nous. Pour réaliser cet objectif, ils se sont tournés vers les étoiles. À partir de modèles numériques de la Galaxie incluant étoiles et matière sombre, ils ont tenté de déterminer si certains types d'étoiles avaient des propriétés cinématiques analogues à celles de la matière sombre. Après de nombreuses simulations ils ont constaté que la métallicité des étoiles était un facteur essentiel. Les étoiles de faible métallicité, c'est-à-dire en jargon astronomique celles qui ont la plus faible proportion d'éléments plus lourds que l'hélium, ont les mouvements les plus proches de ceux de la matière noire.

La métallicité des étoiles est corrélée à leur âge puisque chaque génération se nourrit des précédentes et que chacune accroît le stock de « métaux ». Ce sont donc les étoiles les plus anciennes qui représentent le mieux la matière sombre. On ne doit pas s'en étonner car, partant des mêmes conditions initiales, elles ont subi les mêmes effets de la gravité.

Depuis 2009 les scientifiques mettent au point des expériences dans le but d'observer directement la matière noire par son interaction avec des atomes, de xénon par exemple, dans des lieux situés à des kilomètres sous terre. Comme dans un jeu de billard, l'effet d'une particule de matière sombre heurtant un noyau atomique est d'autant plus fort que la particule est massive et que sa vitesse est élevée. Si elle est légère et poussive, son impact passe inaperçu. Jusqu'à présent on n'a encore rien détecté et l'on n'a donc pas pu obtenir la distribution des vitesses des particules de matière noire à partir de ces expériences. C'est pour cette raison que l'on s'est tourné vers les étoiles en espérant qu'elles nous diraient pourquoi les mesures souterraines ne donnent rien.

Il reste au moins un écueil à passer : on ne connaît pas bien les vitesses des étoiles les plus vieilles. Mais cela devrait être rapidement réglé grâce au télescope spatial Gaia qui scrute la Voie lactée depuis 2014.

***La Voie lactée représentée à partir des premières observations de Gaia. Une carte complète avec un milliard d'étoiles est attendue pour le 25 avril.
(ESA/Gaia/DPAC)***



Formation de la Lune

Basé sur un communiqué CNRS/INSU

L'impacteur qui a percuté la Terre pour créer la Lune n'était pas plus gros que Mars. C'est ce que suggère la modélisation de l'effet chimique de l'« impact géant ». Le coupable serait un objet relativement « petit », représentant au maximum 15% de la masse de la Terre.

C'est au milieu des années 1970 que les astronomes élaborèrent la théorie actuelle de formation de la Lune : notre satellite aurait été créé suite à une collision géante entre la Terre et une protoplanète de la taille de Mars (environ un dixième de la taille de la Terre) appelée Theia. La collision aurait produit un nuage de gaz et de débris, lequel se serait rapidement condensé pour donner naissance à la Lune. Cette hypothèse de l'impact géant est toutefois confrontée aujourd'hui à une difficulté importante : elle ne peut expliquer pourquoi la Lune et la Terre sont isotopiquement identiques.

Pour y remédier, deux modèles différents ont récemment été proposés, qui expliqueraient dans quelle mesure la Lune se révèle être un véritable clone de la Terre, mais avec des prédictions qui se révèlent radicalement différentes pour la taille de Theia. Dans le premier scénario, deux demi-Terres auraient fusionné pour former le système Terre-Lune. Les astres résultants de cette union seraient

de natures identiques par symétrie impacteur-impacté. La deuxième hypothèse suggère que Theia devait être un petit projectile (quelques pour cent de la masse de la Terre) qui heurta notre planète à très grande vitesse.

Afin de départager ces deux scénarios, les scientifiques ont cherché à déterminer comment chaque modèle prédit la chimie globale de la Terre. Qu'il s'agisse d'un petit ou d'un grand impacteur, ce dernier a dû laisser une empreinte chimique dans le manteau terrestre, qui diffère selon la masse de Theia. Les chercheurs ont donc confronté ces résultats aux mesures géochimiques du manteau terrestre.

Ils ont ainsi effectué plus de deux millions de simulations de l'impact et des équilibres chimiques qui en résultent, en variant la masse de Theia mais également d'autres paramètres parmi lesquels le degré de fusion de la Terre avant et après l'impact, la profondeur de pénétration du noyau de l'impacteur dans le manteau terrestre ou encore son degré d'équilibre avec ce manteau. Quel que soit le scénario, il s'avère qu'un impacteur de masse supérieure à 15% de la masse de la Terre – c'est-à-dire légèrement plus lourd que Mars – n'est pas cohérent avec la chimie du manteau ; il fabrique systématiquement un manteau trop enrichi en métaux tels que le nickel et le cobalt.

Par conséquent, la Lune a dû se former suite à une collision avec un impacteur relativement petit et de haute énergie, garantissant un manteau terrestre tel que celui que nous observons aujourd'hui et une composition isotopique lunaire identique à celle de la Terre.



*Vue d'artiste d'une collision telle que celle qui a donné naissance à notre satellite.
(NASA/JPL-Caltech)*

Au cœur de la Voie lactée

On a longtemps considéré le centre de notre galaxie comme un endroit tranquille où se reposent les plus anciennes étoiles. Toutefois, la place est si encombrée qu'il est difficile de l'étudier en détail et de distinguer les mouvements des différents objets.

Une nouvelle analyse de dix mille étoiles de type solaire du bulbe galactique a été réalisée à partir de neuf ans d'archives du télescope spatial Hubble. Elle révèle en réalité un environnement dynamique avec des étoiles de tous âges se mouvant à des vitesses différentes à la manière de voyageurs dans un hall de gare encombré. Les mouvements de ces étoiles dépendent de la composition chimique. Celles qui sont riches en métaux (cf. p. 152) se déplacent de façon moins désordonnée mais plus rapidement que les autres autour du centre de la Galaxie.

De nombreuses théories tentent d'expliquer la formation de la Galaxie. Certains astronomes pensent que le bulbe s'est formé en même temps qu'elle il y a 13 milliards d'années. Toutes les étoiles devraient alors être très vieilles et avoir des mouvements analogues. Selon d'autres spécialistes, le bulbe s'est formé plus tard, progressivement, et a évolué après les premières générations d'étoiles. Certaines étoiles devraient alors être plus jeunes que d'autres et être enrichies en métaux produits par les générations précédentes. Elles devraient aussi montrer des mouvements différents de leurs aînées.

La réalité est moins tranchée et la nouvelle analyse montre les caractéristiques des deux modèles. Elle se base sur des données obtenues avec les caméras Advanced Camera for Surveys et Wide-Field Camera 3 du télescope spatial (cf. photo, page suivante). Des spectres acquis par le VLT de l'ESO ont aidé à estimer la composition chimique des étoiles.

Les astronomes ont divisé les étoiles en deux groupes selon leur contenu en métaux, plus spécifiquement en fer, ce contenu étant estimé à partir des couleurs. Ils ont trouvé que les étoiles les plus métalliques circulaient deux fois plus vite que celles de l'autre groupe.

Seul le télescope spatial Hubble avait la capacité de mener à bien cette étude grâce à sa grande résolution qui permet de séparer ces étoiles à 26 000 années-lumière. Il fallait aussi une base de temps suffisamment grande pour distinguer les mouvements individuels.

Les astronomes avaient choisi d'étudier les étoiles de type solaire car elles sont très nombreuses. Les études antérieures avaient été réalisées sur des étoiles géantes, plus facilement observables, mais elles ne représentent qu'une petite fraction de la vie stellaire et sont donc peu nombreuses. De futures études devraient viser d'autres régions du bulbe pour décrire au mieux sa structure tridimensionnelle.

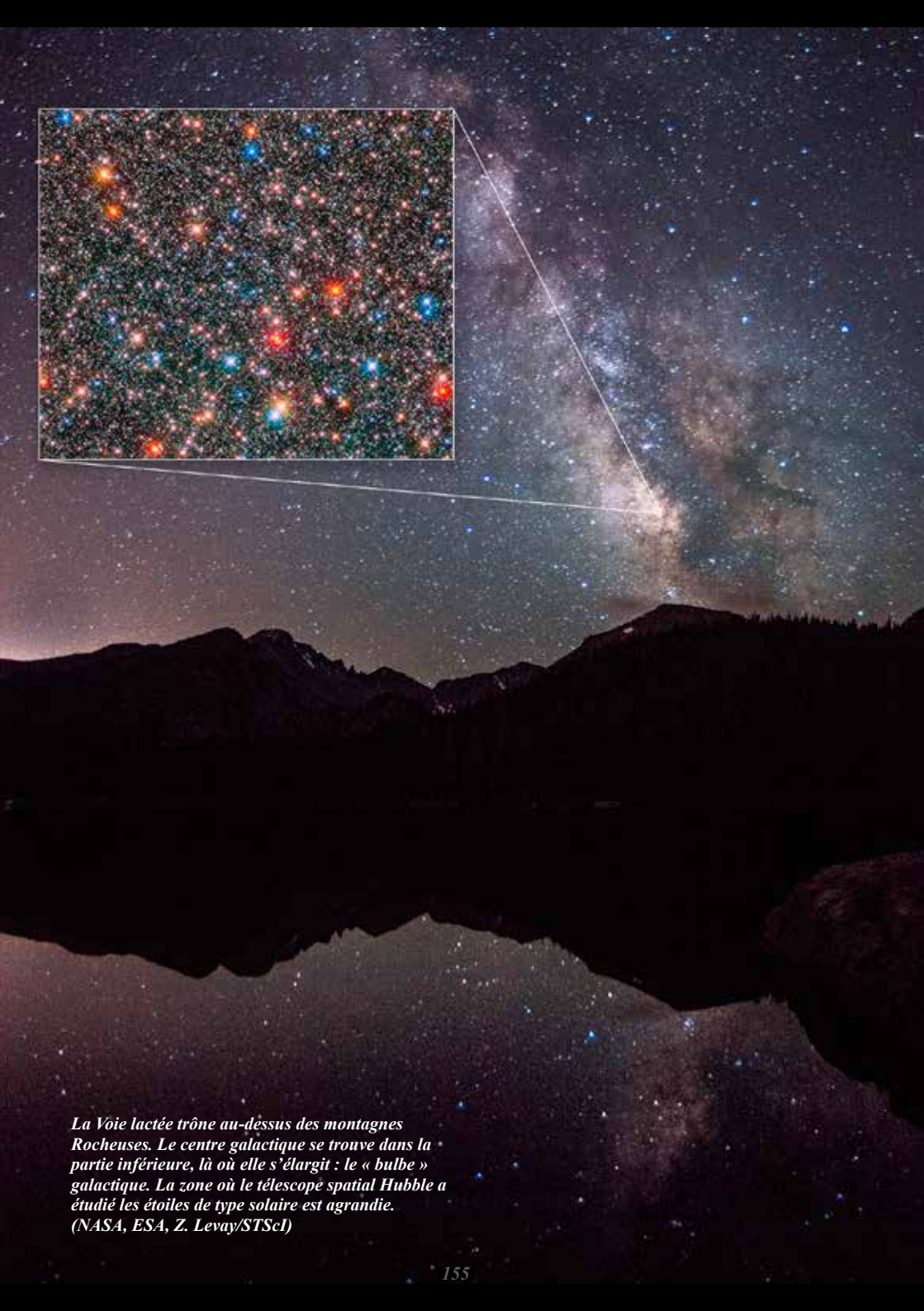
Ces travaux pavent la voie pour le futur grand télescope spatial James Webb qui devrait être lancé en 2019 et qui devrait préciser l'archéologie de la Voie lactée et sonder plus profondément les populations stellaires du bulbe.

SPT0615-JD

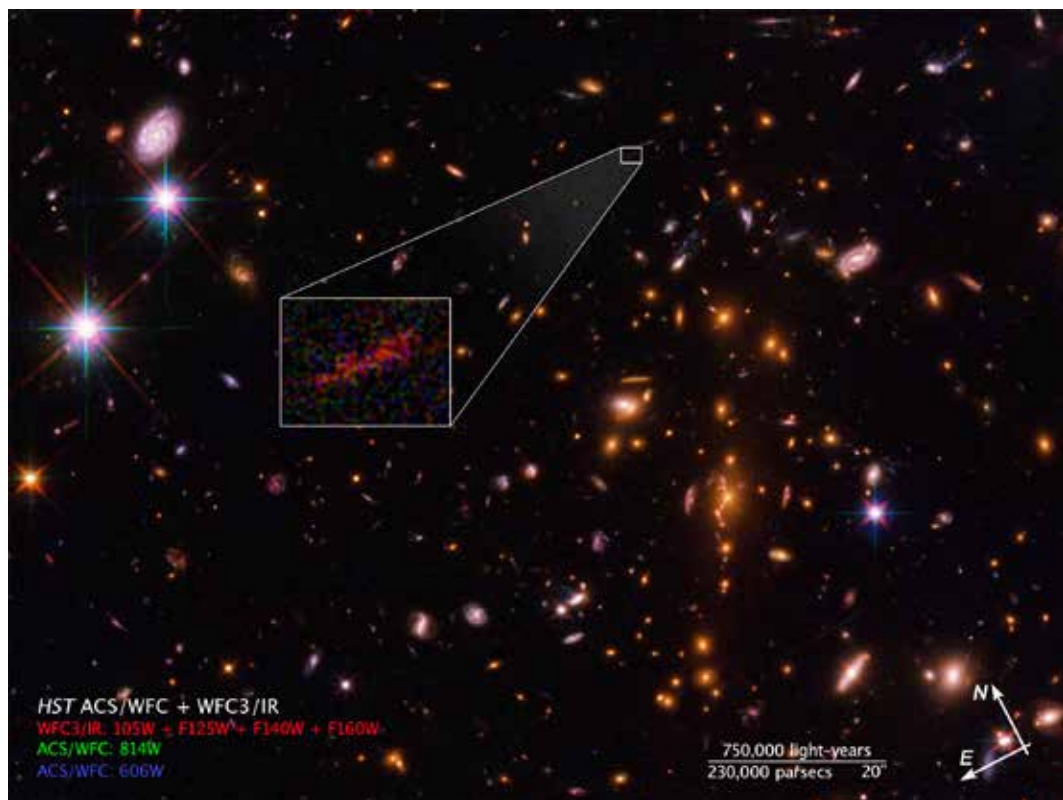
En scrutant intensivement l'Univers profond, les télescopes spatiaux Hubble et Spitzer ont fini par tomber sur la légendaire aiguille de la meule de foin, en l'occurrence la galaxie la plus lointaine dont l'image a été amplifiée et allongée par un effet de lentille gravitationnelle.

Cette galaxie embryonnaire, SPT0615-JD, est vue telle qu'elle était 500 millions d'années après le Big Bang. Ce n'est pas la seule galaxie connue de cette époque, mais les quelques autres apparaissent comme de petits points rouges. Celle-ci, au contraire, a son image transformée par l'interposition d'un amas massif de galaxies. Elle paraît plus brillante et étirée en un arc de deux secondes d'arc de long. C'est la première fois que l'observation d'une galaxie aussi lointaine permet d'analyser les effets spatiaux de la lentille gravitationnelle et de remonter aux dimensions et à la structure de la galaxie.

L'effet de lentille est souvent évoqué ici. Prédit par Albert Einstein il y a un siècle, il est mis à profit par les astronomes pour voir plus



La Voie lactée trône au-dessus des montagnes Rocheuses. Le centre galactique se trouve dans la partie inférieure, là où elle s'élargit : le « bulbe » galactique. La zone où le télescope spatial Hubble a étudié les étoiles de type solaire est agrandie.
(NASA, ESA, Z. Levay/STScI)



loin dans l'Univers et découvrir des objets qui auraient été invisibles autrement.

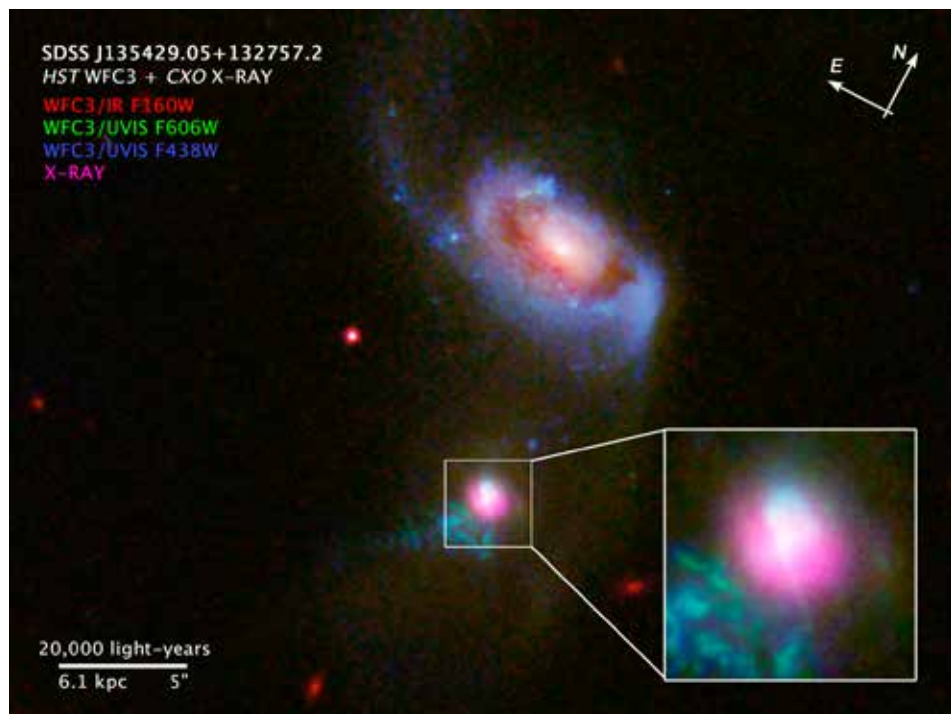
SPT0615-JD a été identifiée dans le cadre du survey RELICS (Reionization Lensing Cluster Survey) de Hubble et du programme associé S-RELICS du télescope spatial infrarouge Spitzer. La mission de RELICS est de découvrir des galaxies distantes telles que celle-ci derrière des amas massifs de galaxies. Pour ce faire RELICS a observé pour la première fois 41 de ces amas en infrarouge avec Hubble. C'est durant l'analyse des données de l'amas SPT-CL J0615-5746 que la nouvelle galaxie a été détectée.

La combinaison des données Hubble avec celles de Spitzer a permis d'en calculer l'âge, ou plutôt le « lookback time » – le temps mis par la lumière pour nous en parvenir. Il est

***La galaxie SPT0615-JD.
(NASA, ESA, B. Salmon/STScI)***

de 13,3 milliards d'années. Une première analyse donne à cette galaxie une masse de seulement trois milliards de soleils, soit un pour cent de celle de notre galaxie. Elle mesure moins de 2 500 années-lumière, c'est-à-dire la moitié de notre compagnon, le Petit Nuage de Magellan. On peut la considérer comme un prototype des bébés galaxies qui sont nées peu après l'Univers lui-même.

SPT0615-JD est à la limite des possibilités du télescope spatial Hubble mais aisément dans celles de son bientôt successeur, le James Webb Space Telescope. Celui-ci aura dans ses tâches d'étudier les populations stellaires et l'activité de formation stellaire dans l'Univers jeune.



Éruptions dans J1354

Les astronomes ont observé une double éruption du trou noir supermassif de la galaxie SDSS J1354+1327 (J1354 en abrégé). Ces éruptions sont en quelque sorte des renvois que fait le trou noir après s'être trop gavé.

Le télescope spatial Chandra avait détecté une brillante émission X au cœur de la galaxie, signe de la présence d'un trou noir supermassif. L'émission provient du gaz chauffé à des millions de degrés par les champs gravifique et magnétique du trou noir. Une partie du gaz tombe irrémédiablement dans le trou noir tandis qu'une autre partie parvient à s'échapper sous la forme de jets de particules de haute énergie.

En comparant les images X de Chandra et celles dans le domaine visible prises par Hubble, on a pu déterminer que le trou noir est bien au centre de la galaxie et qu'il est enrobé d'un voile épais de poussière et de gaz. On a montré qu'il avait absorbé de grandes quan-

La galaxie SDSS J1354+1327 (encadrée) et sa voisine en interaction.

(NASA, ESA, J. Comerford/University of Colorado-Boulder)

tités de gaz en même temps qu'il rejetait des particules de haute énergie.

À un moment, cette éjection s'est arrêtée avant de reprendre 100 000 ans plus tard. On a ainsi la preuve que les trous noirs peuvent s'activer et se désactiver alternativement sur des périodes très brèves comparées aux 13,8 milliards d'années de l'Univers.

Les astronomes pensent que c'est la galaxie voisine, en interaction avec J1354 qui a déclenché les deux épisodes en envoyant des nuages de matière vers le noyau, nuages qui ont été avalés par le trou noir.

Les astronomes ont utilisé des données optiques de Hubble, des télescopes Keck (Hawaii) et APO (Apache Point Observatory) pour montrer qu'un cône de gaz a été ionisé sur 30 000 années-lumière au sud du centre de

la galaxie, sans doute par l'explosion de rayonnement autour du trou noir lors de ses agapes. Au nord de la galaxie, à 3 000 années-lumière du trou noir, une onde de choc témoigne de l'activité plus récente, 100 000 ans après la précédente.

On pense que les bulles de Fermi qui encadrent le centre de la Voie lactée et que l'on peut observer dans les domaines gamma, X et radio, témoignent du même genre d'activité dans le passé. Actuellement le trou noir de notre galaxie est au repos, mais tôt ou tard il devrait se réveiller.

Naines brunes dans Orion

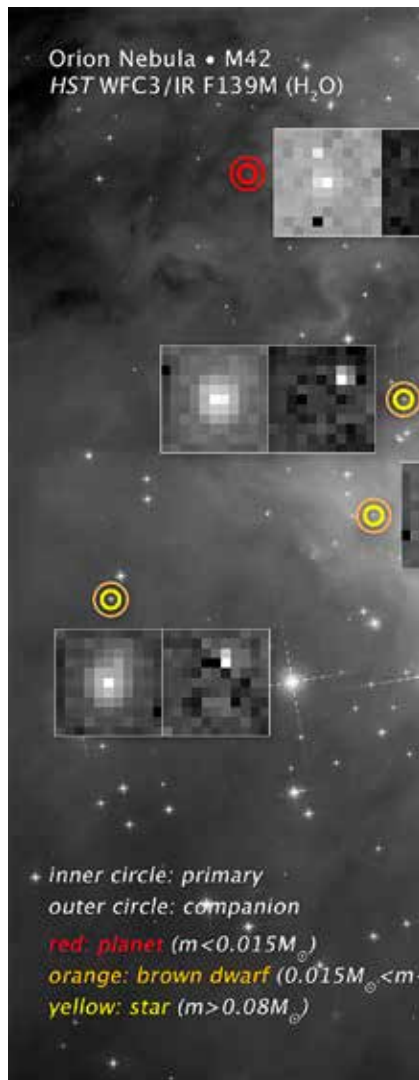
Les naines brunes, ces astres intermédiaires entre les étoiles et les planètes, sont sans doute parmi les objets les plus communs de l'Univers. Leur cœur n'est pas assez chaud pour entretenir des phénomènes de fusion nucléaire. Elles se révèlent d'une grande importance pour comprendre comment se forment les planètes et les étoiles.

À 1 350 années-lumière de nous, la nébuleuse d'Orion est un laboratoire de choix, relativement proche, permettant d'étudier la formation des étoiles de tous types et des naines brunes. Pour identifier celles-ci les astronomes se réfèrent à la présence d'eau dans leur atmosphère. En effet, les naines brunes sont froides et leur atmosphère contient de la vapeur d'eau. En même temps, en raison de leur température, elles rayonnent principalement dans l'infrarouge où se trouvent justement les bandes spectrales de l'eau. Ces observations sont très difficiles depuis le sol puisque l'atmosphère terrestre contient elle-même de l'eau qui absorbe la lumière infrarouge des objets.

Le télescope spatial Hubble n'est pas concerné par ce problème. Les astronomes l'ont donc utilisé pour réaliser un vaste survey dans la nébuleuse d'Orion. Ils ont trouvé la plus grande population connue à ce jour de naines brunes, éparpillées parmi des étoiles jeunes. Certaines ont pour compagnes des naines brunes très légères ou, dans trois cas, des planètes géantes.

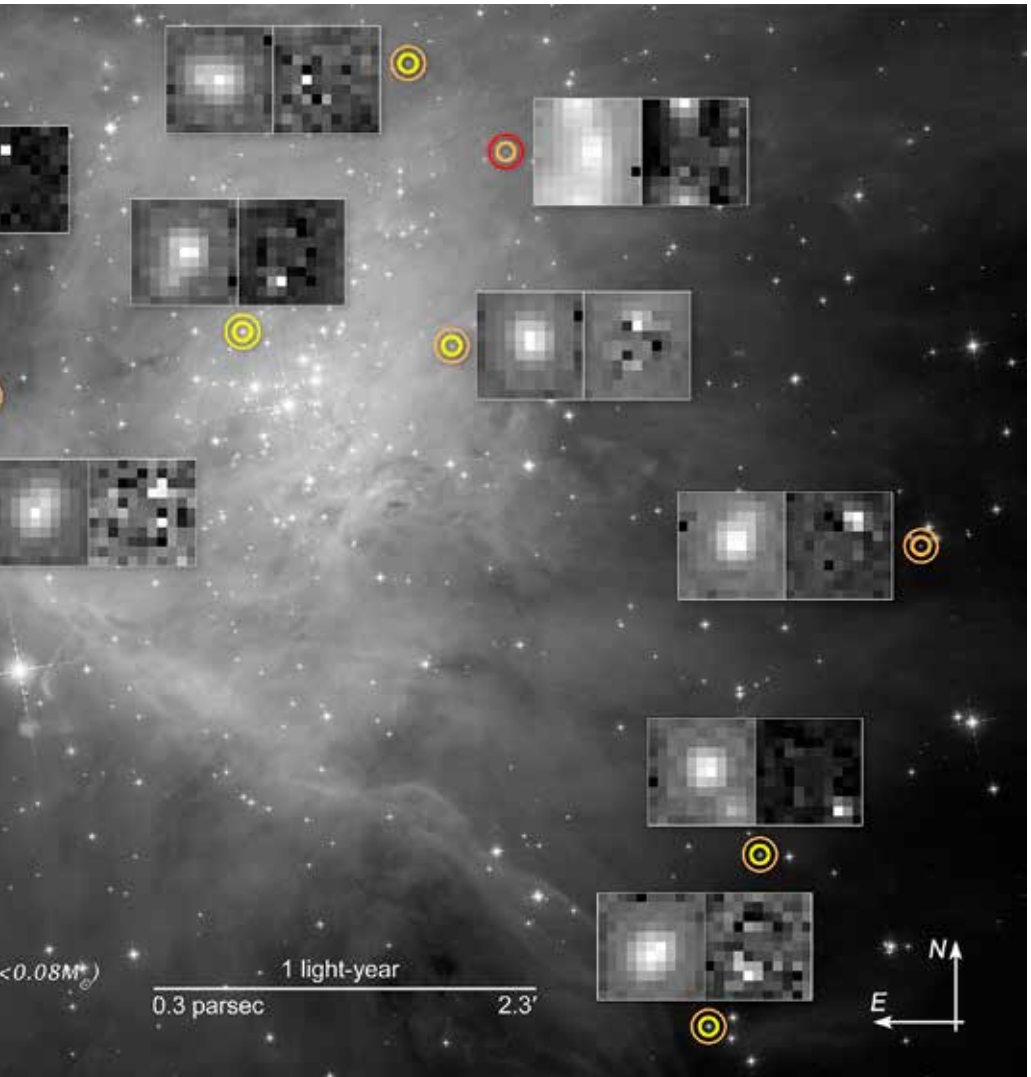
Parmi les 1 200 étoiles rouges candidates naines brunes identifiées par Hubble, les astronomes distinguent deux classes, celles avec et sans eau. Ces dernières sont des étoiles plus lointaines de la Galaxie, rougies par la distance en raison de l'absorption par les poussières interstellaires. Les plus brillantes contenant de l'eau sont des étoiles naines rouges. Les plus faibles sont des naines brunes ou des planètes.

Des techniques sophistiquées de traitement d'image ont permis de séparer les images de nombreux compagnons faibles. Il reste à voir lesquels sont de vrais compagnons et lesquels résultent d'alignements chanceux. La présence d'eau dans leur atmosphère suggère fortement qu'ils s'agit



en général de compagnes de bon aloi, naines brunes ou planètes.

Au total les astronomes ont relevé 17 naines brunes compagnes potentielles de naines rouges, une paire de naines brunes, une paire naine brune et planète, une paire potentielle naine rouge



et planète, une paire potentielle naine brune et planète et une paire potentielle de planètes.

La combinaison des données infrarouge de Hubble et d'une puissante méthode de traitement d'image a ainsi permis d'obtenir un grand échantillon non biaisé d'astres jeunes de faibles masse, isolés ou en couples. Ce succès devrait pousser les astronomes à revisiter les archives du télescope spatial. Des trésors doivent s'y cacher.

*Objets doubles de faible masse dans Orion.
(NASA, ESA,
G. Strampelli/STScI)*