



MUSKES/A. Fruchter et al. / WFPZ/HST

4. LE PHÉNOMÈNE DE LENTILLE GRAVITATIONNELLE se matérialise par la déformation d'images d'objets brillants – des étoiles ou, comme ici, des galaxies – qui prennent la forme d'arcs. Le trajet de la lumière est dévié par la présence d'un objet massif situé entre la source et l'observateur. Cet effet peut amplifier la luminosité d'un objet très éloigné – par exemple une étoile noire.

La pression de radiation était désormais assez intense pour bloquer la contraction de l'étoile, dont le rayon et la masse ont augmenté par accumulation de matière. Au bout de 19 000 ans dans la phase noire, l'astre a atteint une centaine de masses solaires et une température de surface de 5 800 kelvins. L'étoile émettait un rayonnement électromagnétique dont le spectre était semblable à celui du Soleil, mais avec une luminosité un million de fois supérieure.

Température modérée, mais forte luminosité

Alimentée par la fusion thermonucléaire centrale, une étoile classique a un cœur porté à 200 millions de kelvins, un rayon de cinq millions de kilomètres et, surtout, une température de surface de 100 000 kelvins. Pour une même masse, le cœur d'une étoile noire est resté relativement froid, à une température d'à peine 400 000 kelvins. L'astre n'émettait pas non plus de rayonnement ultraviolet intense et ne détruisait pas les molécules du nuage de gaz qui l'entourait.

Pendant 200 000 ans, la masse de l'étoile noire a continué de croître, tout comme sa luminosité, sa température de surface et son rayon, qui a atteint un maximum de six unités astronomiques. L'augmentation de sa masse a entretenu une contraction adiabatique sur le nuage de neutralinos

aux alentours, de sorte que de la matière noire était captée en continu et servait de carburant à l'étoile. C'est à ce stade que les réserves d'énergie étaient les plus hautes. Mais, petit à petit, elles se sont épuisées.

Il faudra attendre encore 100 000 ans pour que l'étoile noire atteigne 720 masses solaires. Son alimentation par l'annihilation des neutralinos s'est alors achevée et l'astre a entamé sa métamorphose. Sa luminosité n'a cependant pratiquement pas varié. Perdant toujours de l'énergie, fournie en moindre quantité par la matière noire, l'étoile a commencé à se contracter. Son rayon est devenu inférieur à une unité astronomique.

Pour évacuer à travers une surface plus petite l'énergie produite, la température a augmenté et a atteint 23 000 kelvins. Le cœur de l'objet s'est réchauffé fortement : la température y est passée à 15 millions de kelvins et le deutérium est entré en fusion pendant 50 000 ans. Toutefois, cela n'a pas suffi à stabiliser l'étoile, qui a continué de se contracter. Quand la source d'énergie formée par les neutralinos fut définitivement remplacée par la contraction gravitationnelle, le reste de matière noire a flambé une dernière fois et a produit, pendant 20 000 ans, un sursaut de luminosité. Mais l'étoile a continué à se contracter et les températures de cœur et de surface ont augmenté. L'intense rayonnement ultraviolet qui en a résulté

a détruit l'hydrogène moléculaire du gaz environnant, qui cessa d'alimenter l'étoile.

La fusion thermonucléaire de l'hydrogène s'est déclenchée et a alimenté en énergie l'astre, qui n'avait désormais plus rien de noir : il n'y avait plus d'annihilation de matière noire en son sein. L'astre s'est transformé en étoile de population III classique, mais de masse bien supérieure à celle de ses congénères – 780 masses solaires contre une centaine pour les étoiles de population III ordinaires. Son rayon était de six millions de kilomètres, seulement huit fois celui du Soleil. Et les températures de surface et de cœur étaient respectivement de 100 000 et 300 millions de degrés. La phase noire, qui s'est étalée sur 400 000 ans, venait de s'achever.

Les étoiles de population III, du fait de leur masse importante, ont eu une vie brève. Elles ont consommé rapidement l'hydrogène. Après quelques millions d'années, elles ont pu exploser en hypernova – d'une puissance équivalente à celle d'une centaine de supernovae. Elles ont laissé en leur cœur un trou noir et ont éjecté de grandes quantités de matière qui ont constitué de nouvelles étoiles ordinaires.

Comment les observer ?

Pour confirmer le scénario que nous avons décrit, il est nécessaire d'observer des étoiles noires. Or ces astres sont situés à des distances cosmologiques. Le télescope spatial *James Webb* (JWST pour *James Webb Space Telescope*), que la NASA projette de lancer en 2018, pourrait les traquer. En plus du visible, le télescope est sensible à l'infrarouge. L'une de ses caméras couvre les longueurs d'onde comprises entre 0,6 et 5 micromètres. Or le pic de luminosité d'une étoile noire dont la température de surface est de 20 000 kelvins se situe vers 0,15 micromètre de longueur d'onde. Ce rayonnement ultraviolet est décalé vers le rouge en raison de l'expansion de l'Univers et serait détecté sur Terre avec une longueur d'onde de 1,5 à 3 micromètres.

En 2010, l'un de nous (P. Gondolo), Erik Zackrisson, de l'Université de Stockholm, et leurs collègues ont montré que la luminosité de ces objets, bien que dix millions de fois plus brillants que le Soleil, serait trop atténuée pour être détectable directement. Ils ont suggéré qu'une lentille gravitationnelle, tel un amas de galaxies, interposée entre une étoile noire et la Terre, résoudrait la difficulté. Au voisinage de l'amas, l'espace est courbé, ce qui dévie les rayons lumineux de l'étoile

noire passant à proximité. En concentrant la lumière vers l'observateur, la lentille amplifie la luminosité de la source. Il deviendrait alors possible d'observer les étoiles noires situées derrière l'amas, malgré la distance.

La probabilité de détecter une étoile noire dépend de la quantité de ces astres pendant l'âge sombre. Si les conditions de formation ont été propices, la fraction d'étoiles de population III passées par la phase noire serait élevée. Mais dans ce cas, le processus de réionisation serait à revoir. Lors de la réionisation, les étoiles de population III ont émis un fort rayonnement ultraviolet qui a détruit l'hydrogène moléculaire et empêché la condensation du gaz. Si les étoiles noires ont été nombreuses, le rayonnement ultraviolet a été moins intense et la condensation du gaz s'est poursuivie plus tardivement dans l'histoire de l'Univers.

La forme du halo de matière noire peut avoir des conséquences sur l'observation. Si le halo n'est pas sphérique mais triaxial, on montre que les neutralinos suivent des orbites chaotiques qui nourrissent sans cesse

BIBLIOGRAPHIE

E. Zackrisson *et al.*, Finding high-redshift dark stars with the *James Webb Space Telescope*, *Astrophysical Journal*, vol. 717, pp. 257-267, 2010.

K. Freese *et al.*, Supermassive dark stars : detectable in JWST, *Astrophysical Journal*, vol. 716, pp. 1397-1407, 2010.

D. Spolyar *et al.*, Dark stars : a new look at the first stars in the Universe, *Astrophysical Journal*, vol. 705, pp. 1031-1042, 2009.

F. Iocco, Dark matter capture and annihilation on the first stars : preliminary estimates, *Astrophysical Journal*, vol. 677, pp. L1-L4, 2008.

D. Spolyar *et al.*, Dark matter and the first stars : a new phase of stellar evolution, *Physical Review Letters*, vol. 100, 051101, 2008.

la région centrale. L'étoile, jamais à court de matière noire, peut alors atteindre des masses de plusieurs millions de masses solaires, et une luminosité un milliard de fois supérieure à celle du Soleil. Les observations de la sonde WMAP imposent le nombre de ces étoiles noires géantes que le télescope *James Webb* devrait être capable de détecter directement.

D'ici quelques années, les étoiles noires ne seront peut-être plus uniquement un sujet théorique et spéculatif. Elles seront utilisées pour la recherche de la matière noire, en complément des études au LHC (le Grand Collisionneur de hadrons à Genève) et des expériences de détection directe et indirecte. Ces astres permettraient aussi de résoudre l'énigme des trous noirs de plusieurs milliards de masses solaires qui peuplent le centre de certaines galaxies primordiales. Comme les étoiles noires finissent leur vie sous la forme de trous noirs de milliers à plusieurs millions de masses solaires, ces derniers pourraient être les briques élémentaires qui, en fusionnant, ont formé les trous noirs supermassifs. ■

Restez en contact avec l'actualité scientifique.

POUR LA
SCIENCE
www.pourlascience.fr



Rejoignez-nous sur Facebook
<http://bit.ly/pls-facebook>



Suivez-nous sur Twitter
<http://twitter.com/PourlaScience>



Abonnez-vous à nos flux RSS
<http://bit.ly/pls-rss>



Recevez nos lettres d'information
<http://bit.ly/pls-newsletters>



Visitez notre site Internet
<http://www.pourlascience.fr>

Des jardins mauresques à la Renaissance

Felix Arnold

L'étude archéologique d'une villa de l'époque califale, près de Cordoue, suggère que la conception des jardins orientaux a influencé celle des jardins d'agrément de la toute première Renaissance italienne, où se concrétisent des idées humanistes.



Quand Jean de Gorze, l'envoyé du roi de Francie orientale auprès du calife, parvient à Cordoue en 950, il est stupéfait, mais désapprobateur. La splendide capitale du royaume hispano-arabe Al-Andalus arbore en effet des rues pavées, des bains publics, une poste, des jardins... autant d'expressions, selon lui, de la coupable sensualité païenne. Tous les Européens ne réagissent cependant pas ainsi: vers 967, Gerbert d'Aurillac, le futur pape Sylvestre II, se rend en Espagne afin d'y profiter des écrits astronomiques et mathématiques des savants arabes, ce qui fit de lui plus tard le promoteur des «chiffres arabes» en Europe. La civilisation arabo-musulmane était alors à son apogée.

Parce qu'elle est européenne, *Qurtuba*, c'est-à-dire Cordoue, était l'un des hauts

lieux de transmission du savoir musulman au monde chrétien, transmission qui s'opérait aussi dans les villes espagnoles reconquises par les princes chrétiens, telles Tolède ou Séville. La bibliothèque de Cordoue contenait des dizaines de milliers de manuscrits, dont des traductions arabes d'œuvres antiques, réalisées à Bagdad, qui donnaient accès au savoir oublié de l'Antiquité. C'est grâce à une traduction latine des œuvres d'Aristote, réalisée à Cordoue et parvenue à Paris, que Thomas d'Aquin créa la scolastique, à l'origine de la philosophie médiévale.

Cordoue attirait et produisait donc des intellectuels de toutes confessions: le médecin juif Moïse Maïmonides et le philosophe musulman Averroès y sont tous les deux nés; le second y a aussi mené

ses recherches philosophiques. Outre cette influence sur la pensée, les usages cordouans ont sans doute eu un impact sur d'autres pans de la culture européenne. Comme nous pensions que l'art du jardin d'agrément en fait partie, nous avons étudié de près les restes du parc privé de la villa de l'un des ministres du Calife. Sa disposition se révèle pour l'essentiel similaire à celle d'un jardin d'agrément florentin ou romain du XV^e siècle, ce qui suggère bien une influence.

L'art des jardins qui se pratiquait dans l'Espagne musulmane avait été importé d'Orient et d'Afrique du Nord. Les parcs et jardins se trouvaient en général près des palais, des maisons de maître et des riches villas des alentours de la ville. Comme tous les jardins orientaux, ils