



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