

➤ ainsi dire privilégiée, au sein de la Voie lactée. La partie centrale de la galaxie est très densément peuplée d'étoiles, ce qui implique que les explosions stellaires potentiellement dangereuses pour la vie s'y produisent plus souvent. Mais le Soleil, par chance, se trouve assez loin du centre galactique, dans une région où la densité stellaire est beaucoup plus faible. Il y a donc moins de sursauts gamma catastrophiques.

On en revient ainsi au paradoxe de Fermi. Bien que la Voie lactée contienne plus de 100 milliards d'étoiles, ces astres se trouvent pour une bonne part dans les régions centrales, précisément là où la probabilité de survie d'organismes complexes – et *a fortiori* intelligents – est très réduite. À cause de l'effet dévastateur des sursauts gamma, seules les régions extérieures de la galaxie, beaucoup moins peuplées d'étoiles, sont potentiellement habitées.

En rapportant nos résultats à l'Univers dans son ensemble, nous sommes parvenus à la conclusion que seules 10% des galaxies (les plus massives et celles dont la métallicité est la plus élevée) étaient en mesure d'abriter une vie complexe. De surcroît, comme ces grandes galaxies mettent longtemps à se former, il se pourrait que la vie complexe telle que nous la connaissons ne soit apparue dans le cosmos qu'il y a au mieux 5 milliards d'années (soit durant le dernier tiers de l'histoire de l'Univers).

## UN MULTIVERS HOSTILE

Ma collègue Licia Verde, à l'université de Barcelone, nous a alors suggéré que ce résultat avait un lien avec l'énergie sombre. Depuis 1998, année de la découverte selon laquelle l'Univers est en expansion accélérée, nous savons que le cosmos contient une composante dont l'effet équivaut à celui d'une «gravité répulsive». Sa nature est inconnue, mais la possibilité la plus simple est celle d'une «constante cosmologique» non nulle (dans les équations d'Einstein décrivant le lien entre matière et géométrie de l'espace-temps). Son action tend à disperser la matière et à accélérer la vitesse à laquelle les galaxies s'éloignent les unes des autres. Pourquoi la constante cosmologique a précisément la valeur que nous observons est l'un des grands enjeux de la cosmologie moderne.

Le lien entre la valeur de la constante cosmologique et la formation des galaxies est facile à comprendre. Puisque cette constante agit comme une gravité répulsive, plus elle est élevée, plus elle aurait empêché la formation des grandes structures de l'Univers, les galaxies et les amas de galaxies. L'inverse est bien sûr vrai : des valeurs plus faibles, voire négatives de la constante cosmologique auraient pour effet d'engendrer bien plus de galaxies que l'on en observe en réalité.

Dès les années 1980, avant que ce paramètre ne soit mesuré expérimentalement,



Steven Weinberg, de l'université du Texas à Austin, s'est servi d'un argument désormais célèbre pour estimer sa valeur. Il a démontré que si la constante cosmologique avait une valeur positive et élevée, ses effets répulsifs auraient complètement empêché la formation des galaxies. Dans ce cas, l'Univers ne contiendrait pas non plus de planètes ni, bien sûr, de vie. Steven Weinberg en a déduit que la constante cosmologique ne pouvait pas dépasser une certaine limite. Depuis, grâce à diverses observations astrophysiques et cosmologiques, les chercheurs ont mesuré la valeur de la constante cosmologique, qui se révèle très proche de la limite établie par Steven Weinberg.

L'approche de Steven Weinberg ne permet cependant pas de déterminer une limite inférieure pour la constante cosmologique. On peut juste dire que si elle était inférieure à ce que nous observons – voire négative –, la formation de galaxies aurait été encore plus favorisée. L'Univers contiendrait davantage de galaxies et donc, en principe, de planètes habitables.

C'est ici qu'interviennent les sursauts gamma. Un univers qui contiendrait plus de grandes structures serait aussi peuplé d'un

L'observatoire spatial *Fermi*, de la Nasa, est spécialisé dans l'étude des rayons gamma. Il a été mis en orbite le 11 juin 2008. Il est équipé de deux télescopes, le LAT et le GBM. Le second est dédié à la détection des sursauts gamma. Le 17 août 2017, *Fermi* a contribué à une observation historique : il a détecté le sursaut gamma accompagnant la fusion de deux étoiles à neutrons dont l'émission en ondes gravitationnelles a été enregistrée par les interféromètres géants *Ligo* et *Virgo*. C'était la première détection d'une émission électromagnétique coïncidant avec une détection d'ondes gravitationnelles.

nombre plus important de petites galaxies dans lesquelles, comme on l'a dit, les sursauts gamma sont plus fréquents. Pire, les galaxies naines tendent à s'accumuler au voisinage des plus grandes. Or nous avons vu que pour être à l'abri des sursauts gamma, la vie intelligente doit se développer sur une planète située dans les régions externes d'une galaxie massive. Mais si cette galaxie est entourée d'un essaim de galaxies naines, les explosions stellaires qui s'y produisent affecteront les régions périphériques de la plus grande. Et dans ce cas, on ne serait plus à l'abri nulle part : les régions centrales de la grande galaxie seraient inhabitables à cause de leur population stellaire trop dense, tandis que l'extérieur le serait aussi, cette fois à cause de la proximité des galaxies satellites naines, sources de nombreux sursauts gamma.

De fait, la Voie lactée semble très spéciale de ce point de vue, puisqu'on s'attendrait à ce qu'elle soit, comme d'autres de sa taille, entourée d'un grand nombre de galaxies naines. Les deux Nuages de Magellan comptent parmi les galaxies naines les plus proches, mais ils sont tout de même trop lointains pour que les sursauts gamma qui s'y produisent présentent un quelconque danger. Cela soulève de nouvelles questions. Pourquoi n'y a-t-il pas plus de galaxies naines autour de la Voie lactée ? Vivons-nous dans un endroit particulier ? Et tout cela a-t-il quelque chose à voir avec la valeur précise de la constante cosmologique ?

## UN UNIVERS AUX CONDITIONS RARES

Avec mes collègues, dont Antonio Cuesta, lui aussi à l'université de Barcelone, nous avons essayé d'évaluer l'effet de la constante cosmologique. Pour ce faire, nous avons simulé le processus de formation des galaxies dans différents modèles d'univers caractérisés par des valeurs distinctes de la constante cosmologique. Nous avons ensuite vérifié dans chaque cas la probabilité de trouver des galaxies comparables à la nôtre : des galaxies massives, mais dont les environs ne sont pas encombrés d'un nombre trop important de galaxies naines dangereuses.

Le résultat, c'est qu'effectivement, les valeurs trop faibles de la constante cosmologique sont défavorisées si l'on souhaite maximiser les chances qu'une vie intelligente apparaisse dans l'Univers, tout simplement parce que dans ce cas, il est très difficile de trouver des configurations comparables à celle de notre voisinage galactique. Jusque-là, aucun calcul n'était parvenu à trouver une limite inférieure à la valeur de la constante cosmologique. Or l'encadrement donné par la limite supérieure proposée par Steven Weinberg et notre limite inférieure est très serré. Il en résulte que l'existence de la vie complexe n'est compatible

# La vie est compatible avec une fenêtre étroite de valeurs de la constante cosmologique

qu'avec une marge étroite de valeurs possibles de la constante cosmologique.

La conclusion à laquelle nous parvenons est que les sursauts gamma jouent un rôle fondamental dans la régulation de la vie complexe dans l'Univers (telle que nous la connaissons). Une densité trop grande d'étoiles massives, celles qui produisent les sursauts gamma, empêche l'évolution de la vie complexe aussi bien dans les galaxies naines qu'au centre des galaxies géantes. D'un autre côté, dans les régions les plus externes d'une grande galaxie comparable à la nôtre, il n'y a pas de sursauts gamma, mais pas de planètes non plus. Un environnement galactique comparable à celui du Système solaire constituerait le seul compromis possible : il contient suffisamment d'étoiles pour synthétiser les éléments lourds nécessaires à la formation des planètes, mais pas trop.

Cela expliquerait que les civilisations intelligentes ne soient pas aussi abondantes qu'on aurait pu le penser, comme le suggère le paradoxe de Fermi. Et curieusement, on peut déduire la valeur de la constante cosmologique en cherchant la probabilité maximale de formation d'une galaxie comme la nôtre – une géante dépourvue d'un trop grand nombre de galaxies satellites naines dangereuses.

Les mathématiciens britanniques de la Seconde Guerre mondiale réussirent à estimer correctement la production mensuelle de tanks allemands sans rien faire d'autre qu'examiner quelques numéros de série. De même, il semble que nous puissions inférer certaines propriétés du multivers à partir du seul cas connu : l'univers dans lequel nous vivons. Les univers dont la constante cosmologique est plus élevée ou plus faible ne semblent pas aptes à abriter une vie intelligente, ce qui laisse penser que le nôtre se trouve dans une situation comparable à celle du grain de café mentionné plus haut. Et pour reprendre l'exemple du nombre de lignes d'autobus, le fait de savoir que nous vivons dans « l'univers numéro 27 » nous indique qu'il ne peut pas y avoir beaucoup d'univers dans lesquels la vie complexe est possible. ■

## BIBLIOGRAPHIE

T. Piran et al., **Cosmic explosions, life in the universe, and the cosmological constant**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 116, article 081301, 2016.

T. Piran et R. Jimenez, **Possible role of gamma ray bursts on life extinction in the universe**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 113, article 231102, 2014.

A. Melott, **Did a gamma-ray burst initiate the late Ordovician mass extinction ?**, *International Journal of Astrobiology*, vol. 3(1), pp. 55-61, 2004.