

pouvons pas y faire d'expériences. Mais, fort heureusement, nous disposons du nôtre, dont nous pouvons mesurer les propriétés (son «numéro de série» en quelque sorte). L'une de ces propriétés est intimement liée aux sursauts gamma et à leurs effets dévastateurs sur la vie.

Par une froide journée de février 2014, à Berne, mon collègue Tsvi Piran, de l'université hébraïque de Jérusalem, et moi prenions un verre au café *Einstein*. Nous nous sommes demandé si les sursauts gamma étaient assez fréquents pour porter atteinte à la vie sur Terre. Peu de temps auparavant, nous avions achevé un travail démontrant que ces catastrophes cosmiques se produisent de préférence au sein de galaxies beaucoup plus petites que la Voie lactée et dont la métallicité est beaucoup plus basse (pour les astrophysiciens, les «métaux» sont tous les éléments du tableau périodique plus lourds que l'hydrogène et l'hélium). Dès lors, le fait de vivre dans une galaxie géante contenant beaucoup d'éléments «lourds» nous avait-il mis à l'abri des radiations fatales émises par les sursauts gamma?

MORTELLES EXPLOSIONS

Mais de quoi s'agit-il exactement? Les sursauts gamma ont été découverts à l'époque de la Guerre froide. Dans les années 1960, pour espionner les essais nucléaires soviétiques, les États-Unis lancèrent un satellite capable de déceler les rayons gamma que de telles pratiques ne manqueraient pas d'engendrer. Rapidement, les scientifiques notèrent un grand nombre de flashes gamma provenant de différentes parties du ciel, et non du sol. Ils conclurent rapidement que ces explosions n'étaient pas d'origine soviétique, mais astronomique. Quant à ce qui les produisait, le mystère est resté entier pendant des décennies. On sait aujourd'hui que les sursauts gamma sont d'origine extragalactique. On pense qu'ils résultent de l'explosion en supernova de certaines étoiles très massives (d'au moins 20 à 30 masses solaires) ou de collisions entre étoiles à neutrons (voir l'encadré page ci-contre). Ce qui est indiscutable, c'est qu'ils comptent parmi les phénomènes les plus violents de l'Univers: en quelques secondes, un seul sursaut gamma libère autant d'énergie que le Soleil durant toute sa vie.

Ces sursauts prennent la forme de jets directionnels (voir la figure page 40) et le danger viendrait lorsqu'une planète se trouve dans l'axe de ces jets. Si la Terre était frappée par un tel jet émis lors d'une explosion, à quelques milliers d'années-lumière au sein de la Voie lactée, la première conséquence en serait la destruction de la couche d'ozone (O_3). En effet, les rayons gamma ioniseraient les molécules de diazote (N_2), lesquelles se combineraient aux atomes d'oxygène de l'ozone pour donner des oxydes nitriques et nitreux. Le phénomène ne prendrait que quelques jours. Sans

la protection de la couche d'ozone, la surface de la Terre serait exposée au rayonnement ultraviolet du Soleil, si nocif pour les protéines en général et pour l'ADN en particulier. Toute forme de vie reposant sur la photosynthèse se verrait atteinte, du plancton aux plantes terrestres, ce qui ferait s'effondrer la chaîne alimentaire à l'échelle mondiale et provoquerait une extinction massive des espèces vivantes.

Reste à déterminer la probabilité qu'une telle catastrophe se produise. Tsvi Piran, David Wanderman, de l'université hébraïque de Jérusalem, et moi avons calculé la fréquence des sursauts gamma dans l'Univers. Nous avons alors estimé la probabilité que l'un d'eux se produise près de la Terre. Ce calcul exige de recourir aux inférences bayésiennes, puisque nous ne pouvons pas répéter l'expérience: nous ne faisons qu'observer le cosmos.

À notre grande surprise, le résultat suggérait que sur 500 millions d'années, la probabilité qu'un sursaut gamma détruise entièrement la couche d'ozone de la Terre est d'environ 50%. Cet ordre de grandeur est très intéressant, car il signifie que les sursauts gamma pourraient expliquer certaines extinctions massives passées. Notez qu'à partir d'ici, nous considérerons en priorité les organismes pluricellulaires complexes. Bien que la vie microbienne existe sur Terre depuis environ 4 milliards d'années, la vie complexe, elle, n'est présente que depuis environ 1 milliard d'années. Selon notre calcul, au

En quelques secondes, un sursaut gamma libère autant d'énergie que le Soleil durant toute sa vie

cours de cette période, il est très probable qu'un sursaut gamma se soit produit assez près de la planète pour affecter sa biosphère, mais guère plus d'un. D'ailleurs, certains chercheurs ont suggéré que l'extinction de l'Ordovicien, la première des cinq grandes extinctions de l'histoire de la Terre, soit due à un sursaut gamma survenu il y a 450 millions d'années. Si ce scénario est assez exotique et si d'autres explications sont possibles, nos résultats ne le contredisent pas.

Un autre détail est ici important. La Terre se trouve dans une région particulière, pour ➤

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.