

Les sursauts gamma expliquent-ils le paradoxe de Fermi?

En dépit de la multitude de mondes présents dans le cosmos, nous n'avons pas, à ce jour, détecté de civilisations extraterrestres. Pourquoi? C'est la question que se posait le physicien italien Enrico Fermi. La raison tient peut-être à certaines explosions stellaires puissantes, les sursauts gamma, qui anéantiraient toute vie complexe présente dans leur voisinage.

L'ESSENTIEL

> Si la vie est un phénomène fréquent dans l'Univers, nous devrions détecter des indices de civilisations extraterrestres. Or ce n'est pas le cas : c'est le paradoxe dit de Fermi.

> Les sursauts gamma, explosions stellaires très puissantes, sont capables de détruire la vie complexe sur une planète trop proche.

> Les régions périphériques des galaxies géantes, moins peuplées en étoiles, sont moins exposées à ces dangers.

> L'influence des sursauts gamma sur les chances d'apparition d'une vie complexe impose des contraintes sur l'histoire du cosmos, mais aussi sur le scénario du multivers.

L'AUTEUR



RAÚL JIMÉNEZ
enseignant-chercheur
à l'Institut de sciences
du cosmos de l'université
de Barcelone, en Espagne



En explosant, certaines étoiles massives émettent un puissant rayonnement, un sursaut gamma, qui détruirait la vie présente sur une planète proche.

En 1950, le physicien italien Enrico Fermi s'est posé la question suivante. Si la Voie lactée contient plus de 100 milliards d'étoiles et que le Système solaire n'y constitue pas une exception, le nombre de planètes où la vie se serait développée devrait être gigantesque. Dans ce cas, une vie intelligente aurait dû se développer sur certaines d'entre elles et, tôt ou tard, se serait répandue dans toute la galaxie. Mais alors, pourquoi n'avons-nous détecté aucune civilisation extraterrestre? Pourquoi les extraterrestres ne nous ont-ils pas contactés? Où sont-ils tous?

Ce raisonnement est connu sous le nom de paradoxe de Fermi et, bien qu'il ait donné lieu à une foule d'hypothèses, nous ne disposons à l'heure actuelle d'aucune explication vraiment satisfaisante. Pourtant, depuis quelques années, l'étude d'un certain type de catastrophes cosmiques – les sursauts gamma – suggère que la vie complexe est peut-être beaucoup moins fréquente qu'on ne le pensait. Ces explosions d'étoiles comptent parmi les phénomènes les plus violents de l'Univers et leurs effets dévastateurs s'exercent à des milliers d'années-lumière de distance. Bien qu'on les observe depuis les années 1960, nous ne commençons qu'aujourd'hui à prendre la mesure de leurs effets «stérilisateurs». Ces événements, s'ils sont nombreux, pourraient en effet compromettre l'existence même de la vie complexe au sein des galaxies.

LES SURSAUTS GAMMA, DESTRUCTEURS DE VIE

Les sursauts gamma expliqueraient le paradoxe de Fermi, mais leur influence sur l'Univers s'étend bien au-delà. Une analyse détaillée montre que la répartition et le nombre de ces événements dans les galaxies sont intimement liés aux lois les plus fondamentales de l'Univers. Avec des conditions initiales légèrement différentes, le cosmos aurait pu être dénué de galaxies (et donc n'hébergerait pas la vie) ou en aurait produit en grande quantité avec de nombreux sursauts gamma (et la vie complexe y aurait été impossible).

Ce constat suggère que les conditions de l'Univers dans lequel nous vivons se situent dans une étroite fenêtre, définies par des principes physiques encore inconnus, qui autorisent l'existence d'une vie complexe, du moins de la vie telle que nous la connaissons sur Terre. En considérant quelques arguments supplémentaires d'ordre statistique, cet «ajustement fin» soutient peut-être l'une des idées les plus controversées de la science actuelle: l'hypothèse du multivers.

Le raisonnement qui nous amène à relier la présence de la vie dans le cosmos aux sursauts

Les effets dévastateurs des sursauts gamma se manifestent sur des milliers d'années-lumière

gamma et à l'existence de nombreux univers parallèles implique toutes les échelles de la physique: depuis les lois quantiques à la chimie en passant par les processus astrophysiques et l'organisation du cosmos dans son ensemble.

Un élément crucial dans cette discussion est la formation des galaxies. Pourquoi l'Univers s'est-il structuré ainsi, en d'innombrables galaxies, au lieu d'être simplement uniforme et homogène? La réponse, surprenante, est une des grandes découvertes de la cosmologie moderne: les grandes structures de l'Univers trouvent leur origine dans les fluctuations quantiques du vide. Cette conséquence du principe d'incertitude de Heisenberg, intimement liée à la nature quantique du monde, implique que, dans les divers points de l'espace, la densité d'énergie varie spontanément pendant d'infimes fractions de seconde.

En 1981, deux physiciens soviétiques, Gennady Chibisov (décédé en 2008) et Viatcheslav Mukhanov, aujourd'hui au centre Arnold-Sommerfeld de physique théorique, à Munich, ont proposé cette idée: de telles fluctuations quantiques dans l'Univers primordial ont été amplifiées durant la phase d'inflation cosmique, un gonflement exponentiel de l'espace. Ce phénomène, qui se serait déroulé au cours de la toute première fraction de seconde de l'histoire cosmique, aurait eu pour conséquence l'apparition d'irrégularités dans la distribution de la matière, avec des zones plus ou moins denses qui, plus tard, ont constitué les grands vides cosmiques et les énormes amas de galaxies que nous observons aujourd'hui.

Depuis une dizaine d'années, grâce aux observations détaillées du fond diffus cosmologique (le premier rayonnement émis dans l'Univers alors âgé de 380 000 ans), réalisées par les sondes WMAP de la Nasa et Planck, de l'ESA, les cosmologistes ont des arguments solides qui soutiennent la théorie de Gennady Chibisov et Viatcheslav Mukhanov. Celle-ci n'en reste pas moins étonnante. Les lois qui gouvernent l'Univers à l'échelle subatomique

seraient donc responsables des structures aux plus grandes échelles.

L'inflation joue un rôle essentiel dans ce qui précède, puisque c'est précisément la colossale expansion primordiale de l'espace qui a porté les fluctuations quantiques initialement microscopiques à des dimensions cosmiques. La théorie de l'inflation a été développée à la fin des années 1970 et au début des années 1980 par Alexei Starobinsky, de l'institut Landau de physique théorique de Moscou, Andrei Linde, aujourd'hui à l'université Stanford, Alan Guth, du MIT (l'institut de technologie du Massachusetts) et Viatcheslav Mukhanov (même s'il est vrai qu'on peut faire remonter les origines de l'inflation aux articles des physiciens Bill McCrea en 1951 et d'Erast Gliner en 1965).

L'inflation est compatible avec toutes les observations actuelles. Elle explique de façon satisfaisante l'origine des grandes structures cosmiques, mais aussi pourquoi, à très grande échelle, l'Univers est plat (sans courbure apparente). Elle rend aussi compte de plusieurs propriétés subtiles du fond diffus cosmologique. Ce rayonnement est désormais mesuré et cartographié avec une grande précision. Nous savons que si sa température est très uniforme à travers tout le ciel, elle présente d'infimes irrégularités, de l'ordre de quelques parties pour 100 000. Ces variations reflètent les hétérogénéités primordiales de la

distribution de matière, toujours manifestes à l'époque où le rayonnement a été émis et qui seront les germes d'où allaient croître les galaxies. Jusqu'à présent, les observations confirment cette idée, de même que toutes les autres prédictions de la théorie de l'inflation.

DES UNIVERS BAYÉSIENS

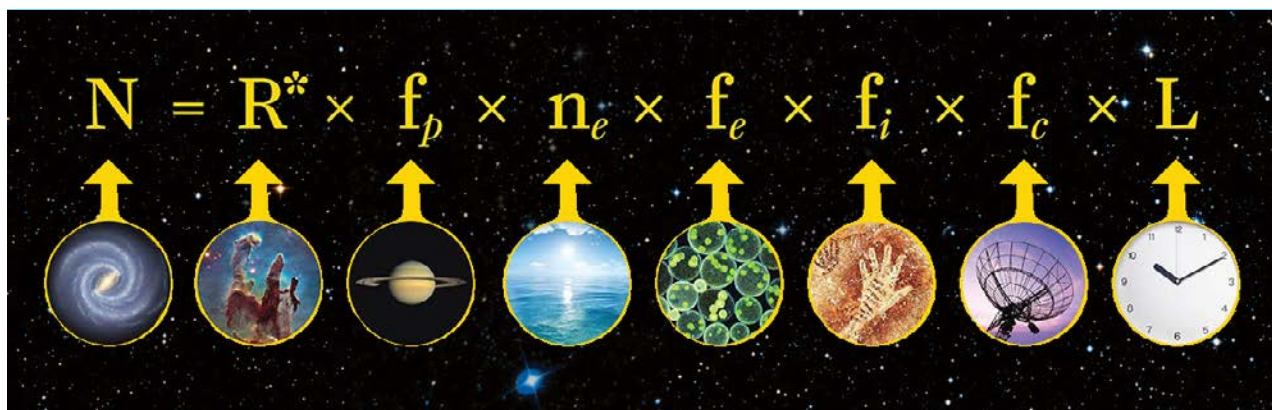
Mais malgré ses succès, la théorie de l'inflation a des implications controversées parmi les scientifiques. Au début des années 1980, Andrei Linde, et d'autres, ont suggéré que l'Univers tout entier était lui-même le produit de fluctuations quantiques ! Et l'inflation ne produirait pas un seul univers, mais une infinité d'univers – ce qu'on appelle le multivers.

Tous les modèles inflationnaires postulent l'existence d'un champ quantique, l'inflaton, responsable de la croissance exponentielle de l'espace aux premiers instants du cosmos. La dynamique de l'inflaton peut être représentée comme celle d'une boule qui roule sur une colline. Lorsque la bille se trouve au sommet, elle a une grande énergie potentielle. Dans le cas de l'inflaton, c'est cette énergie qui déclenche l'expansion de l'espace à un rythme vertigineux. Une fois qu'elle a dévalé la pente, la balle a perdu son énergie potentielle. Traduit en termes cosmologiques, ce moment marque la fin de l'inflation. À partir de là, l'Univers continue à s'étendre, mais au rythme beaucoup plus lent prédit par la théorie originelle du Big Bang.

L'inflation a amplifié les fluctuations quantiques du vide, mais le champ quantique qu'est l'inflaton était aussi soumis au principe d'incertitude de Heisenberg. Les fluctuations de ce champ ont influé sur sa dynamique. Pour reprendre l'analogie de la bille sur sa colline, tout se passe comme si, au lieu de simplement rouler vers le bas tout du long, elle pouvait par moments s'arrêter, voire remonter brièvement de façon spontanée. Cela implique qu'en diverses régions de l'espace, la phase d'inflation aurait démarré et se serait arrêtée à des moments différents. Nous vivrions ainsi dans une « bulle » à l'intérieur de laquelle l'inflation s'est arrêtée à >

L'ÉQUATION DE DRAKE

En 1961, le radioastronome américain Frank Drake a proposé une équation qui évalue le nombre N de civilisations extraterrestres intelligentes dans la Voie lactée. Cette formule est définie comme le produit de différents facteurs : le taux moyen R^* de formation d'étoiles dans la Voie lactée, la fraction f_p de ces étoiles ayant des planètes, le nombre moyen n_e de planètes potentiellement habitables par étoile, la fraction f_e de ces planètes où la vie se développe, la fraction f_i de ces formes de vie qui développent une intelligence et une civilisation, la fraction f_c de ces civilisations qui construisent des moyens de communication détectables depuis la Terre et la période L durant laquelle ces civilisations émettent un signal. Dans son estimation initiale, Frank Drake avait estimé à 10 le nombre de ces civilisations extraterrestres dans la Voie lactée. Mais la valeur attribuée à chaque paramètre présente parfois des incertitudes couvrant plusieurs ordres de grandeur, ce qui rend l'estimation très grossière.



UN ÉVÉNEMENT ASTROPHYSIQUE VIOLENT

La solution au paradoxe de Fermi vient peut-être d'un type d'explosions stellaires : les sursauts gamma. Plusieurs travaux récents suggèrent que, à cause de leurs effets dévastateurs, la vie complexe est peut-être beaucoup moins fréquente dans l'Univers qu'on ne le pensait. Le danger que les sursauts gamma représentent dépend également de la position de la planète abritant la vie au sein de la galaxie.



Sursaut gamma

DES EXPLOSIONS MORTELLES

Les sursauts gamma comptent parmi les phénomènes les plus violents de l'Univers : en quelques secondes, ils peuvent libérer autant d'énergie que le Soleil durant toute son existence. Ils se produisent essentiellement lors de l'explosion en supernova d'étoiles très massives. Leurs effets sont destructeurs sur des distances de plusieurs milliers d'années-lumière.

MENACE SUR LA VIE COMPLEXE

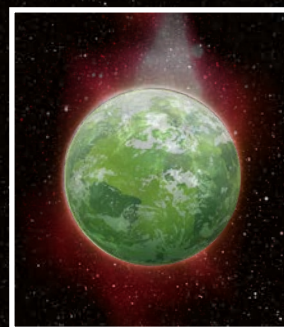
Si le rayonnement d'un sursaut gamma proche atteignait une planète comparable à la Terre, la couche d'ozone serait détruite en quelques jours. Les organismes seraient alors soumis au rayonnement ultraviolet de leur étoile, ce qui affecterait les formes de vie dépendant de la photosynthèse.

Sans sursaut gamma



Couche d'ozone

Avec sursaut gamma



Galaxie géante

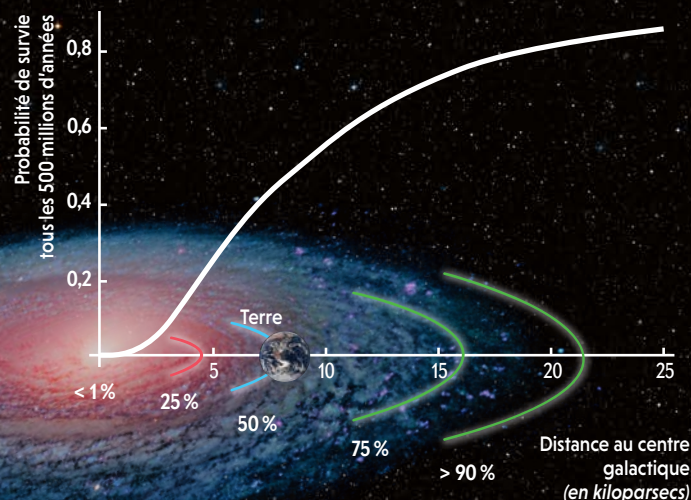
Galaxie naine

LA RÉPARTITION DES SURSAUTS GAMMA

Les sursauts gamma se produisent plus fréquemment dans les galaxies de petite taille (les galaxies naines, *ci-contre*) où la production d'éléments lourds est faible. Dans les grandes galaxies comme la Voie lactée, on les trouve surtout vers le centre (*en rouge, à gauche*). Les régions plus périphériques (*en bleu*) sont relativement à l'abri, mais on y trouve également moins de planètes.

PROBABILITÉ DE SURVIE

Au sein d'une galaxie comparable à la Voie lactée, la probabilité de survie de la vie complexe sur une planète dépend de sa distance au centre galactique. Pour un monde comme la Terre situé à bonne distance, la probabilité qu'un sursaut gamma détruise la couche d'ozone est d'environ 50 % tous les 500 millions d'années. La survenue d'un sursaut gamma est l'une des explications possibles de l'extinction massive de l'Ordovicien, qui s'est produite il y a 450 millions d'années.

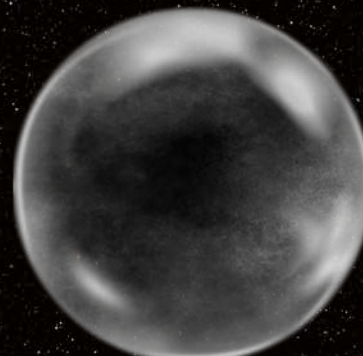


UN UNIVERS TRÈS IMPROBABLE

Les simulations numériques montrent que la formation de grandes galaxies disposant de zones habitables à l'abri des sursauts gamma dépend fortement d'un paramètre fondamental : la constante cosmologique, souvent notée Λ . Depuis 1998, on sait que ce paramètre est très petit, mais non nul, et que son effet équivaut à une sorte de « gravité répulsive » qui tend à contrer l'agrégation de la matière en galaxies. La constante cosmologique n'admet ainsi qu'une petite fenêtre de valeurs compatibles avec l'existence de la vie complexe.

CONSTANTE COSMOLOGIQUE TROP ÉLEVÉE

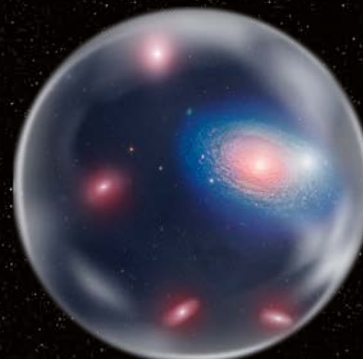
Dans les années 1980, Steven Weinberg, de l'université du Texas à Austin, a remarqué que si la constante cosmologique était trop élevée, ses effets répulsifs sur la matière auraient empêché la formation des galaxies. Un tel univers serait dépourvu de planètes et par conséquent de vie.



Univers sans galaxies

CONSTANTE COSMOLOGIQUE COMPATIBLE AVEC LA VIE

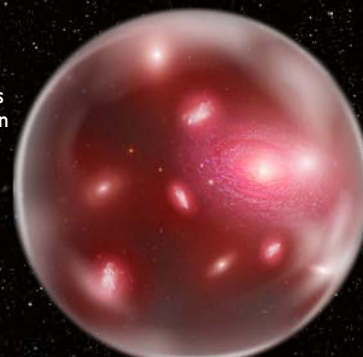
La valeur observée de la constante cosmologique autorise la formation de galaxies comparables à la Voie lactée : de grandes structures entourées d'un faible nombre de galaxies naines satellites et comportant des régions sûres où les sursauts gamma sont rares.



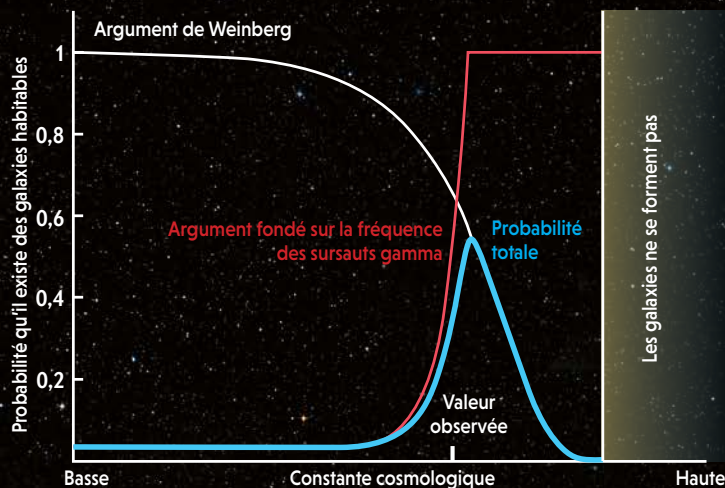
Univers dont les galaxies sont isolées

CONSTANTE COSMOLOGIQUE TRÈS FAIBLE

Dans un univers où la constante cosmologique serait encore plus faible, les galaxies et les planètes seraient encore plus nombreuses. Toutefois, les grandes galaxies comme la Voie lactée seraient entourées d'un essaim de galaxies naines. Les sursauts gamma, fréquents dans ces dernières, stériliseraient les régions périphériques de la grande galaxie, ne laissant aucune région propice au développement de la vie complexe.



Univers contenant trop de galaxies



UN PETIT NOMBRE D'UNIVERS HABITABLES

Les arguments précédents permettent de calculer la probabilité (en bleu) qu'un univers abrite une vie intelligente en fonction de la valeur de la constante cosmologique. Seules des valeurs comprises dans un étroit intervalle semblent compatibles avec l'existence d'une vie complexe.

> un certain instant, mais autour de laquelle l'espace a continué de gonfler de façon démesurée et à engendrer d'autres bulles. Dès lors, la théorie de l'inflation implique l'existence d'un nombre infini d'«univers-bulles».

Ces univers-bulles ne sont pas causalement reliés entre eux, de sorte qu'aucune information ne parviendra jamais à notre Univers en provenance d'un autre. Et c'est là que commence la controverse. Il est impossible d'observer ces autres univers ou de réaliser des expériences démontrant leur existence. Ils pourraient tout aussi bien ne pas exister du tout. Certains, tel Paul Steinhardt, de l'université de Princeton, pensent que l'idée de multivers ne relève plus de la méthode scientifique, mais à la rigueur de la philosophie. Pour autant, certaines considérations statistiques ou probabilistes fondées sur des observations de notre Univers pourraient mettre en lumière des indices de l'existence du multivers.

Mon collègue Fergus Simpson, de l'Institut des sciences du cosmos de l'université de Barcelone, l'explique par l'exemple suivant. Imaginez une table à l'extrême bord de laquelle repose un grain de café. Quelle est l'explication la plus probable de sa présence à cet endroit ? Que quelqu'un en ait décidé ainsi et l'y ait placé avec beaucoup de soin ? Il semble plus économe et naturel d'imaginer qu'une grande quantité de grains ont été renversés et que les autres se trouvent par terre.

Ce type d'argument statistique s'appelle l'inférence bayésienne. Elle s'oppose à la démarche fondée sur l'étude des fréquences d'occurrence, qui consiste à définir les probabilités à partir du nombre de fois où une caractéristique donnée est observée dans un échantillon très grand. Avec l'inférence bayésienne, les chercheurs sont en mesure de tirer des conclusions à partir d'un nombre restreint de données, voire d'une seule. Dans la suite, nous verrons que par certains côtés, l'Univers observable se trouve dans une situation très similaire à notre grain de café.

COMBIEN DE TANKS ?

Un exemple historique illustre de façon fascinante les avantages de cette méthode de raisonnement. C'est le célèbre problème des tanks allemands. Vers la fin de la Seconde Guerre mondiale, les Alliés avaient besoin de savoir à quel rythme les nazis étaient en mesure de produire leurs tanks Panzer. D'après les services de renseignement, le chiffre devait tourner autour de 1 400 par mois : une quantité très élevée qui avait des implications inquiétantes pour les Alliés. Les mathématiciens décidèrent quant à eux d'estimer la production à partir des numéros de série des tanks détruits ou capturés. Ces numéros étaient tous peu élevés et leur distribution conduisit les mathématiciens à conclure que les

L'ORIGINE DES SURSAUTS GAMMA

Ces signaux correspondent à des bouffées de photons gamma relativement brefs, ayant une durée maximale de quelques minutes. Leur détection isotrope sur la voûte céleste suggère une origine extragalactique.



Les astrophysiciens distinguent deux types de sursauts gamma en fonction de la durée du signal. Les événements de moins de 2 secondes sont nommés sursauts courts. Ils sont produits lors de la fusion de deux étoiles à neutrons ou de la coalescence d'une étoile à neutrons avec un trou noir. Les sursauts gamma longs, de plus de 2 secondes, représentent environ 70 % des sursauts gamma. Ils seraient le résultat de l'explosion d'étoiles supermassives telles que les étoiles de Wolf-Rayet (ci-contre WR124 cachée au cœur d'une nébuleuse de gaz) en supernovæ très puissantes nommées hypernovæ ou collapsars, où le cœur de l'étoile s'effondre d'abord sur lui-même en un trou noir sans expulser les couches externes de l'étoile. Une partie de la matière restante de l'étoile forme alors deux jets relativistes partant depuis les pôles du trou noir. En percutant les couches externes de l'étoile, les jets créent une onde de choc qui se propage vers la surface de l'étoile à une vitesse proche de celle de la lumière. L'onde émerge sous la forme d'un intense rayonnement, le sursaut gamma.

Allemands produisaient plus probablement dans les 200 tanks par mois. La guerre terminée, les archives révélèrent qu'en effet, la production avoisinait les 270 tanks mensuels.

Dans le même ordre d'idées, vous pouvez vous-même jouer aux inférences bayésiennes en prenant l'autobus. Imaginez que vous soyez dans une ville inconnue et que le bus dans lequel vous montez porte le numéro de ligne 27. Combien y a-t-il de lignes dans cette ville ? Il paraît peu probable qu'il y en ait des milliers : un bus pris au hasard aurait alors plus de chances d'avoir un numéro à trois ou quatre chiffres. Si votre autobus appartient à la ligne 27, il paraît raisonnable d'en déduire l'existence d'une centaine de lignes, peut-être 200, mais pas beaucoup plus.

Il est important de souligner que ces raisonnements ne nous contraignent pas à échantillonner toute la population de tanks ou de bus. En fait, il suffit d'une seule information pour estimer certaines propriétés de la population entière. Nous procédons de la même façon pour déterminer certaines propriétés du multivers. Il est exact que, par définition, nous n'avons pas accès aux autres univers et que nous ne

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 suggérerait 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.

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.

L'ESSENTIEL

> L'existence de vérités immuables sur le plan moral ou politique est une question philosophique épineuse. Cette existence va de soi selon une conception objectiviste, contrairement à une conception relativiste.

> Des expériences où les participants débattent de sujets controversés renseignent

sur la conception des gens à cet égard.

> Le style de débat dans lequel les gens s'engagent influe sur leur conception de la vérité : l'argumentation pour gagner favorise une conception objectiviste des vérités morales ou politiques, tandis que l'argumentation pour apprendre favorise une vision relativiste.

LES AUTEURS

MATTHEW FISHER
postdoctorant
en sciences sociales
et en sciences
de la décision
à la Carnegie
Mellon University,
aux États-Unis

JOSHUA KNOBE
professeur à
l'université Yale,

aux États-Unis,
dans le programme
de sciences
cognitives
et au département
de philosophie

BRENT STRICKLAND
chercheur en
sciences cognitives
à l'institut
Jean-Nicod, à Paris

FRANK C. KEIL
professeur
de psychologie,
de linguistique
et de sciences
cognitives
à l'université Yale

Débats: vaincre ou apprendre

Dans les débats que nous avons les uns avec les autres, nous adoptons différentes postures : argumenter pour marquer des points ou argumenter pour apprendre. Des expériences montrent que le mode choisi influe sur notre conception de la vérité elle-même.

Lors de la campagne pour les élections présidentielles de 2016 aux États-Unis, au cours du dernier débat entre les candidats Donald Trump et Hillary Clinton, une question concernant le président russe Vladimir Poutine fut posée. « Il n'a pas de respect pour elle », déclara Donald Trump, en montrant du doigt Hillary Clinton. « Poutine, d'après tout ce que je vois, n'a pas de respect pour cette personne. »

Les deux candidats essayèrent ensuite d'aller vers une compréhension plus nuancée des difficiles questions politiques en jeu. Hillary Clinton lança :

« Suggérez-vous que l'approche agressive que je propose échouerait à dissuader l'expansionnisme russe ? »

Donald Trump répondit :

« Non, je suis certainement d'accord pour dire que cela dissuaderait l'expansionnisme russe ; c'est juste que cela servirait aussi à désstabiliser le... »

En fait, non, je plaisante. Ce n'est pas du tout ce qui s'est passé. En réalité, chaque camp visait

à attaquer et à vaincre l'autre. Hillary Clinton a en réalité dit : « C'est parce qu'il [Poutine] préfère avoir une marionnette comme président des États-Unis. » Ce à quoi Trump rétorqua : « C'est vous la marionnette ! »

Des épisodes comme celui-ci sont devenus si fréquents dans les débats politiques contemporains qu'il est facile d'oublier à quel point ils diffèrent radicalement des discussions que nous avons le plus souvent dans notre quotidien. Prenons l'exemple de deux amies qui veulent aller dîner au restaurant. L'une propose : « Essayons le nouveau restaurant indien ce soir. Ça fait des mois que je n'ai pas mangé indien. » Son amie répond : « Tu sais, j'ai lu de mauvaises critiques sur cet endroit. Si nous allions plutôt manger une pizza ? » « Ah ? C'est bon à savoir. Va pour la pizza », conclut la première.

Dans cet exemple, chaque personne vient avec une opinion. Une discussion commence, au cours de laquelle chacune présente un argument, puis écoute l'argument de l'autre, et les interlocutrices s'orientent vers un accord. Ce genre de dialogue se produit tout le temps. Dans nos travaux de recherche, qui impliquent >