

Trous noirs et sursauts gamma

Les sursauts gamma sont les explosions les plus violentes de l'Univers. La formation de trous noirs dotés d'un champ électromagnétique expliquerait leur origine.

Les sursauts gamma sont de brèves émissions de rayonnements gamma et X, découvertes accidentellement en 1969 par des satellites militaires américains. Ils sont souvent suivis d'une émission tardive de rayons X et de lumière visible qui peut durer de quelques jours à quelques mois. Étant donné leur fréquence et leur répartition uniforme sur le fond du ciel, les astronomes pensent qu'il se produit chaque jour, une explosion énorme quelque part dans tout le volume de l'Univers observable. Les sursauts gamma semblent être les images de cataclysmes assez puissants pour être détectables sur des distances de plusieurs milliards d'années-lumière, ce qui équivaut à la production, pendant les quelques secondes du sursaut, d'une énergie comparable à celle qui est rayonnée par toutes les étoiles contenues dans toutes les galaxies de l'Univers observable ! Nous avons élaboré un modèle selon lequel ces événements hors du commun signaleraient la naissance de trous noirs dotés d'un champ électromagnétique.

Nous avons étudié l'effondrement d'une étoile en rotation dotée d'un champ électromagnétique. Beaucoup d'étoiles, le Soleil, par exemple, sont entourées d'un champ magnétique produit par des courants électriques dus à la circulation de la matière stellaire dans leurs profondeurs. Lorsque les couches internes d'une étoile massive se contractent, les lignes de force de son champ électromagnétique suivent le mouvement de la surface à laquelle elles sont ancrées et se resserrent rapidement. En d'autres termes, le champ est « concentré ». Lorsque l'étoile forme un trou noir, cette amplification est énorme, parce que le diamètre de la sphère de matière à laquelle le champ est attaché passe de quelques dizaines de millions de kilomètres à environ un kilomètre.

Or, en 1935, Werner Heisenberg montra qu'au-delà d'une valeur critique, un champ électromagnétique doit provoquer un phénomène qu'il nomma polarisation du vide. En effet, en mécanique quantique, on montre que le vide est, en permanence, rempli de paires de particules et d'antiparticules qui surgissent spontanément, avant de s'annihiler mutuellement. On qualifie ces particules de « virtuelles » parce qu'elles disparaissent presque immédiatement après leur formation. Cependant, en présence d'un champ électromagnétique intense, les paires d'électrons (de charge négative) et d'antiélectrons (de charge positive) sont durablement séparées par l'action du champ et ne s'annihilent pas immédiatement. De virtuelles, ces particules deviennent réelles. Ainsi, lorsqu'un trou noir doté d'un champ électromagnétique se forme, il est entouré d'une sphère, nommée dyadosphère (du grec *duas*, qui signifie paire) à l'intérieur de laquelle, le champ électromagnétique est capable de créer une énorme quantité d'électrons et d'antiélectrons en quelques cent milliardièmes de nanoseconde.

En 1975, l'un d'entre nous (Remo Ruffini) et Thibault Damour, de l'Observatoire de Paris, ont démontré que ce phénomène est le plus efficace pour extraire de l'énergie d'un trou noir. Contrairement aux étoiles, dont seuls quelques pour cent de la masse sont convertis en énergie au cours de leurs dix milliards d'années d'existence, la dyadosphère entou-

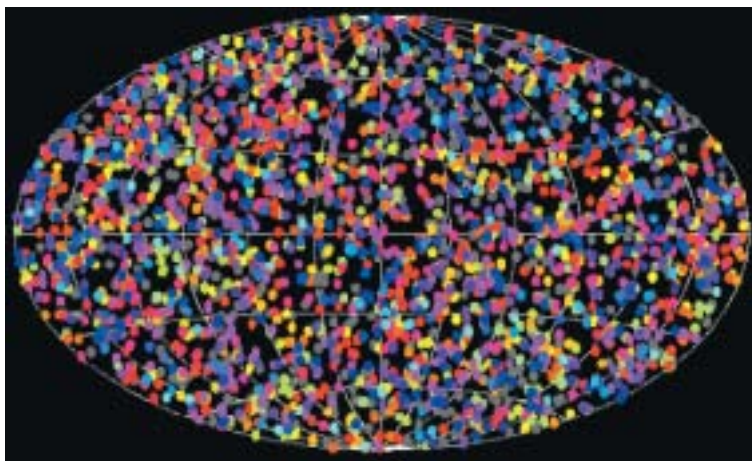
rant un trou noir doté d'un champ électromagnétique peut, en quelques secondes, convertir en énergie jusqu'à 50 pour cent de la masse de l'étoile qui lui a donné naissance.

La dyadosphère entre ensuite en expansion sous la forme d'une coquille de plasma formé d'électrons, d'antiélectrons et de photons gamma (produits par les collisions entre particules et antiparticules) que nous avons nommés impulsions électromagnétiques en paires. Expulsée à des vitesses proches de celle de la lumière, cette impulsion entre ensuite en collision avec les couches supérieures de l'étoile, essentiellement constituées d'hydrogène, qui n'avaient pas été absorbées par le trou noir. Ces restes enrichissent l'impulsion, en électrons, protons et neutrons, jusqu'à ce qu'elle arrive dans une région où le plasma est assez dilué pour être transparent : les photons gamma sont libérés brusquement et produisent le sursaut proprement dit. Par la suite, les protons, et autres particules lourdes accélérées par l'impulsion, viennent frapper le gaz raréfié du milieu interstellaire et provoquent un gigantesque feu d'artifice en rayons X, en lumière visible et en rayonnement radio responsable de l'émission tardive.

Nous avons comparé ce modèle avec les données fournies par trois observatoires spatiaux d'astronomie (BATSE, *X-Chandra*, et Rossi-XTE tous trois américains) pour un sursaut gamma intervenu le 12 décembre 1999. Les calculs s'accordent parfaitement aux observations.

Contrairement à la plupart des modèles proposés jusqu'ici pour expliquer les sursauts gamma, le nôtre ne dépend que de deux paramètres libres : l'énergie de la dyadosphère et la densité de matière dans les couches de l'étoile qui restent à l'extérieur du trou noir. Tous les autres (température, vitesse, densité du plasma, etc.) découlent directement de la théorie et sont parfaitement connus. Il est remarquable que ces prévisions soient valables aussi bien pour le sursaut proprement dit (qui se déroule sur des durées de l'ordre de la milliseconde et sur des distances de l'ordre du millier de kilomètres) que pour l'émission tardive (qui dure quelques mois et se produit à l'échelle de l'année-lumière). De surcroît, ce modèle explique pourquoi le satellite *Chandra* a détecté une raie spectrale du fer dans l'émission retardée de certains sursauts : elle serait produite par le fer contenu dans une étoile voisine lors de son explosion en supernova sous l'effet du choc avec le flash gamma. Il s'agirait là d'un nouveau mécanisme de formation des supernovae.

Remo RUFFINI, Carlo BIANCO, Federico FRASCHETTI, She-Sheng XUE, Université La Sapienza, Rome – Pascal CHARDONNET, IN2P3



La répartition des sursauts gamma (d'intensités différentes) sur le fond du ciel est uniforme d'après cette carte établie par le satellite BATSE. Les astronomes en déduisent qu'ils sont répartis de façon homogène dans l'Univers observable. Les sursauts sont les images de cataclysmes détectables à des milliards d'années-lumière.

Une mite exceptionnelle

La sexualité d'une mite fait tomber un mythe

Au royaume des métazoaires, la diploïdie est reine ! Expliquons-nous : la quasi-totalité des cellules d'animaux pluricellulaires disposent de deux exemplaires de chaque chromosome. Une cellule est haploïde quand elle n'a qu'un chromosome de chaque type. Ainsi, les êtres humains sont diploïdes : nos cellules ont 23 paires de chromosomes et ont chaque gène (à l'exception de certains portés par les chromosomes sexuels) en double.

Cependant, toute règle souffre des exceptions (sauf cette règle !) et les zoologistes connaissent des animaux haplo-diploïdes : les mâles sont haploïdes et les femelles diploïdes. C'est, par exemple, le cas de certains vers. Toutefois, on ne connaissait pas d'organismes pluricellulaires complètement haploïdes. Plus encore, on pensait que la diploïdie avait été très tôt sélectionnée dans le règne animal au profit de l'haploïdie. Celle-ci était condamnée à disparaître devant les atouts majeurs de la diploïdie : le brassage des gènes est favorable à l'évolution, et les «gènes de secours» remplacent parfois les gènes défaillants.

La mite *Brevipalpus phoenicis* étudiée par Andrew Weeks et ses collègues de l'Université d'Amsterdam fait exception. Les mâles, mais aussi les femelles de cette espèce, sont haploïdes : un dogme est tombé. *Brevipalpus phoenicis* est une mite, de la famille des acarins, phytophage qui vit dans les régions tropicales et subtropicales. Par sa voracité ou les virus qu'elle transporte, elle cause d'importants dégâts dans les plantations de citrons, de café, de thé... Parmi les populations étudiées, au Brésil, les mâles sont très rares. Ces mites se reproduisent par parthénogenèse, c'est-à-dire qu'un ovule non fécondé se développe en un organisme adulte femelle. Les cellules de ces animaux ont deux chromosomes. Sont-ils différents (haploïdie) ou homologues (diploïdie) ? Pour trancher, les biologistes ont identifié la structure de ces chromosomes. Ainsi, ils ont détecté qu'une zone, nommée région de l'organisation nucléaire, n'est présente que sur un seul des deux chromosomes. Par ailleurs, une région d'ADN qui code une partie des ribosomes n'existe aussi que sur un seul des deux chromosomes. Enfin, l'étude de microsatellites (des séquences d'ADN répétées) a montré qu'aucun acarien ne porte plus d'un exemplaire d'un gène donné. Les mites *Brevipalpus phoenicis* sont bien haploïdes.

Un examen attentif des œufs a révélé qu'ils renfermaient des bactéries, dites endosymbiotiques, de la famille *Bacteroides*. Afin d'identifier leur rôle, les biologistes les ont éliminées de certains œufs à l'aide d'un antibiotique : les mites qui se sont développées étaient en majorité des mâles ! Une température d'incubation élevée est aussi une cause de formation de mâles. Ainsi, une bactérie féminise les mites de cette espèce, mais on ignore encore par quels mécanismes. L'infection d'un ancêtre haplo-diploïde de *Brevipalpus phoenicis* par des bactéries féminisantes a sans doute entraîné l'apparition d'œufs complètement haploïdes qui se développent uniquement en adultes femelles. Grâce à cette nouvelle espèce, on pourra comparer *in situ* les avantages et les inconvénients de l'haploïdie et de la diploïdie.

Les mites *Brevipalpus phoenicis* des zones tropicales sont des organismes haploïdes : leurs deux chromosomes n'existent qu'en un seul exemplaire tant chez le mâle (en haut) que chez la femelle (en bas).



La biodiversité

Elle est indispensable au bon fonctionnement des écosystèmes.



Sauvegarder la biodiversité ! Tel est le mot d'ordre maintes fois entendu dans divers discours écologistes. Pourquoi cette biodiversité est-elle si importante ? Pour des raisons éthiques ? Esthétiques ? Pas seulement. Michel Loreau, de l'École normale supérieure, et Andy Hector, du Collège impérial d'Ascot, ont montré que le nombre d'espèces végétales influe sur le bon fonctionnement des écosystèmes.

En 1996, dans le cadre de l'étude BIODDEPTH menée dans huit pays européens (l'Allemagne, la France, l'Irlande, le Royaume-Uni, la Suisse, le Portugal, la Grèce et la Suède), des écologistes ont isolé plusieurs parcelles, où ils ont éradiqué progressivement les plantes existantes, afin d'y planter des plantes à fleurs et des herbes à raison de 2 000 plants par mètre carré. Ils ont établi cinq degrés de diversité, de la monoculture à la richesse initiale du site en espèces végétales.

Malgré les différences climatiques de chaque pays, les plantes poussent d'autant mieux qu'elles sont en présence d'espèces multiples. Plusieurs caractéristiques de l'écosystème augmentent avec le nombre d'espèces : la productivité des plantes (la masse végétale à l'air libre et celle enterrée), la rétention d'éléments, tel l'azote, le recyclage de ces éléments, la résistance aux maladies et la composition du sol en invertébrés.

Toutefois, l'interprétation de ces résultats a longtemps été controversée. Certains y voyaient un effet de sélection, c'est-à-dire que plus les espèces sont nombreuses, plus la probabilité d'en avoir une dotée d'une forte productivité est grande. Selon d'autres, les espèces améliorent leur exploitation des ressources par un effet de complémentarité : par exemple, les légumineuses fixent l'azote atmosphérique qui fertilise le sol et profite ainsi à d'autres espèces.

M. Loreau et A. Hector ont repris les résultats de l'étude BIODDEPTH et les ont analysés à l'aune de méthodes originales inspirées des techniques statistiques utilisées en génétique, afin de distinguer l'influence de chaque effet. Ils en concluent que la moyenne de l'effet de sélection sur les différents sites est nulle, et que la relation entre le nombre d'espèces et l'augmentation de productivité sur l'ensemble des parcelles ne dépend que de l'effet de complémentarité.

Les écologistes ont ainsi montré expérimentalement ce qui a longtemps été affirmé sans preuve, à savoir que le fonctionnement d'un écosystème dépend de la variété des espèces présentes dans cet écosystème. Toutefois, des questions demeurent. Par exemple, combien d'espèces participent à cet effet de complémentarité ? Suffit-il de quelques espèces seulement, ou un grand nombre doivent-elles interagir pour assurer le niveau de productivité observé dans les écosystèmes naturels ? Quoi qu'il en soit, les autorités compétentes dans la protection de l'environnement et la sauvegarde de la biodiversité disposent désormais d'un argument solide pour se faire entendre.