

Les poissons-dragons

Les membres de l'ordre des Stomiiformes (poissons-dragons, à l'aspect souvent effrayant) constituent aussi une part importante des poissons mésopélagiques (vivant entre 200 et 1 100 mètres de profondeur) et bathypélagiques (à plus de 1 100 mètres). Leur taille est comprise entre deux centimètres (*Cyclothone pygmaea*) et 50 centimètres (*Opistomias micripnis*). Parmi les vertébrés vivant dans le monde aujourd'hui, *Cyclothone* est le genre dont les espèces sont représentées par le plus grand nombre d'individus. Chez ce genre, ainsi que chez le genre *Gonostoma*, on constate aussi un intéressant phénomène de changement de sexe au cours de la croissance.

Comme les Myctophidae, les poissons-dragons ont une distribution mondiale et sont fréquents surtout dans les zones tempérées et subtropicales. Quelques-uns d'entre eux entreprennent aussi des migrations verticales. Leurs photophores, de construction particulière, sont arrangés suivant seulement deux rangées. Ils ont la même importance pour la taxonomie que chez les Myctophidae. Leur lumière est d'origine bactérienne, ce qui a été confirmé récemment par la biologie moléculaire.

On trouve à l'état fossile dans les Carpates les représentants de trois familles des Stomiiformes : les Gonostomatidae, les Photichthyidae et les Stenopterygiidae.

Le genre fossile *Scopeloides* (Gonostomatidae) est très abondant dans les Carpates. Il est connu aussi dans les faciès équivalents du Caucase, des Alpes et de l'Iran. On le considère comme l'ancêtre de *Cyclothone* et de *Gonostoma*. *Scopeloides* a des rangées de petites dents qui sont interrompues par des dents plus grandes, ce qui est caractéristique de beaucoup de membres de l'ordre ayant un mode de vie de grands prédateurs. On peut observer le même phénomène de l'évolution mosaïque, parce qu'au niveau de l'ostéologie il n'y a pas beaucoup de différences : *Vinciguerria*, représentant des Photichthyidae, a été longtemps rangé parmi les Gonostomatidae parce qu'il possède le même plan primitif du corps, mais récemment l'appartenance à ce genre a été révisée.

Argyropelecus et un Maurolicinae (familles de Stenopterygiidae, Hache d'argent) sont deux genres appartenant à un groupe très spécialisé, avec un corps haut, déprimé, et des yeux

télescopiques. Ils ressemblent vraiment à une hache d'argent flottant verticalement dans l'eau. Les photophores sont placés en groupes sur le côté ventral du corps, sur des écailles modifiées. Dans ce cas, la bioluminescence est utilisée pour camoufler la face ventrale en mimant la faible lumière qui provient de la surface. Chaque organe est recouvert d'un filtre coloré pourpre qui ne laisse passer que les longueurs d'onde correspondant au bleu : la couleur de la lumière émise imite ainsi exactement celle de la mer.

Une dizaine de représentants fossiles du genre *Argyropelecus* ont été trouvés en Moravie ; les 400 autres spécimens sont plus proches de *Maurolicus*.

Tous les genres fossiles des poissons lumineux des Carpates, *Oligophum*, *Eomyctophum*, *Scopeloides*, *Vinciguerria*, *Argyropelecus* et un Maurolicinae représentent le plus ancien enregistrement fossile sûr de la faune abyssale et pélagique. Quelques genres crétacés ont été rangés chez les Myctophiformes et les Stomiiformes, mais en fait les descriptions doivent être réévaluées. Dans le Néogène (Miocène et Pliocène), qui fait suite à l'Oligocène, les poissons lumineux sont plus nombreux et plus diversifiés et très proches de la faune actuelle. Il sont connus dans les sédiments des régions téthysiennes en Algérie, en Espagne et en Italie. Les documents fossiles provenant des Carpates apparaissent donc comme un excellent point de départ pour l'étude des origines des poissons mésopélagiques.

Ruzena GREGOROVA est chef du Laboratoire de paléontologie et de géologie. au Musée morave, à Brno.

R. GREGOROVA, (*Stomiiformes, Teleostei*) from the Tertiary of the Zdanice-Subsilesian Unit (Moravia), Acta Mus. Moraviae, Sci. Nat., 74, 1-2:87-96, 1992.

R. GREGOROVA, Première découverte de *Glarichelys knori* (Gray), tortue marine (Chelonidae) dans l'Oligocène de des couches à menilite de Moravie (Tchécoslovaquie), Acta Mus. Moraviae, Sci. Nat., 77:63-69, 1993.

R. GREGOROVA et E. PURKYNova, A preliminary note on the records of the fishes (Teleostei) from the Lower Cretaceous of the Silesian Unit (Hauterivian-Barremian), Cas. Slez. Muz. Opava (A), 44:281-283, 1995.

Les sursauts gamma

GERALD FISHMAN • DIETER HARTMANN

Des observations récentes de ces explosions mystérieuses font espérer que l'on en connaîtra bientôt les sources. On envisage notamment des collisions d'étoiles à neutrons.

Alfred T. Kamajian

Trois fois par jour environ, un puissant éclair de rayons gamma, invisible à l'œil mais détectable par les instruments astronomiques, illumine le ciel : chaque éclair, qui dure entre quelques secondes et quelques minutes, émet plus d'énergie que le Soleil n'en émettra au cours de sa vie de dix milliards d'années. Quelle est l'origine de ces sursauts et comment libèrent-ils tant d'énergie ? Les astrophysiciens étudient ce mystère, mais, depuis près de 30 ans, l'imprévisibilité et la fugacité du phénomène avaient pénalisé son étude : les impulsions proviennent de toutes les directions de l'espace et disparaissent rapidement sans laisser de traces.

Toutefois le 28 février 1997 sera marqué d'une pierre blanche : le satellite italien *Beppo-SAX* observa un sursaut pendant environ 80 secondes. Grâce à la précision de visée de ses détecteurs, les astronomes identifieront la position du sursaut – nommé GRB 970228 – avec une précision de quelques minutes d'angle dans la constellation d'Orion, entre les étoiles Alpha du Taureau et Gamma d'Orion. En moins de huit heures, les opérateurs du satellite, à Rome, retourneront *Beppo-SAX* afin d'observer la même région avec le télescope X du même satellite. Ils décelèrent alors une source de rayons X (un rayonnement

d'énergie inférieure à celle des rayons gamma) qui faiblissait rapidement, et déterminèrent sa position à moins d'une minute d'angle.

Jamais un sursaut n'avait été localisé si précisément, ni si rapidement. De puissants télescopes opérant dans le visible, dont les champs de vision sont étroits, purent réagir et le traquer. Des astronomes aux îles Canaries, appartenant à une équipe internationale dirigée par Jan van Paradijs, de l'Université d'Amsterdam, apprirent la détection par courrier électronique. Ils disposaient heureusement de temps d'observation sur le télescope *William Herschel* de 4,2 mètres qu'ils avaient utilisé pour rechercher d'autres sursauts. Vingt et une heures après le sursaut, ils photographièrent la région, puis renouvelèrent la prise de vue huit jours plus tard : une tache lumineuse, présente sur la première photographie, s'était évanouie.

Il y a plus. Le 13 mars, le télescope *NTT* de l'Observatoire européen austral, situé à La Silla, au Chili, visa longtemps la position déterminée par *Beppo-SAX* et y discerna une lueur diffuse. Plus tard, à l'aide du Télescope spatial *Hubble*, on y décela un point entouré d'une lueur allongée. De nombreux astrophysiciens pensent que cette lueur représente une galaxie, mais cette hypothèse est à confirmer.

S'il s'agit bien d'une galaxie, elle doit être très éloignée, près des limites de l'Univers observable. Dans ce cas, pour que la lumière parvienne jusqu'à nous, l'énergie libérée lors d'un sursaut gamma est extraordinaire.

Espoirs déçus

Cette découverte a redonné espoir aux spécialistes des sursauts gamma, encore sur le coup de deux déconvenues. En novembre 1996, le satellite *HETE*, équipé d'instruments de localisation des sursauts gamma, ne se sépara pas de sa fusée de lancement et fut perdu. Le mois suivant, la sonde russe *Mars'96*, emportant plusieurs détecteurs de rayonnement gamma, retomba dans l'océan Pacifique après un défaut de fonctionnement du moteur de la fusée de lancement. Ces engins faisaient partie d'une flotte spatiale conçue pour rechercher de manière concertée l'origine des sursauts gamma. Parmi les nouveaux satellites équipés d'instruments sensibles aux rayons gamma,

1. UN LOINTAIN SURSAUT de rayonnement atteint la Terre et les détecteurs à bord du satellite *Beppo-SAX*. Malgré son intensité extrêmement élevée, ce rayonnement ne traverse pas l'atmosphère terrestre. Toutefois, des télescopes pointés sur un sursaut gamma récent nommé GRB 970228 décelèrent une émission rémanente dans le visible qui subsista plusieurs semaines.

seul *Beppo-SAX* fut placé sur orbite, le 20 avril 1996.

Les sursauts gamma furent découverts accidentellement à la fin des années 1960 par la série de satellites *Vela*, du Département américain de la défense. Ces satellites détectives traquaient les éventuelles explosions nucléaires clandestines soviétiques dans l'espace, peut-être dissimulées derrière la Lune. À la surprise des militaires, les satellites enregistrèrent un rayonnement gamma qui n'émanait pas de la Terre, mais de l'espace. Lorsque cette découverte fut révélée au public, en 1973, les astronomes saluèrent la découverte d'un nouveau phénomène cosmique.

Après ces premières observations, les supputations sur la source des sursauts gamma abondèrent : trous noirs, supernovae, restes denses et sombres d'étoiles nommés étoiles à neutrons, etc. Toutefois, la question fondamentale demeurait : on ignorait si les sursauts naissaient à 100 années-lumière ou à plusieurs milliards d'années-

lumière de la Terre, dans une galaxie lointaine. Par conséquent, il était difficile d'estimer l'énergie des événements originaux.

Des étoiles à neutrons locales ?

Au cours des années 1980, les astronomes s'accordèrent pour penser que les sursauts provenaient d'étoiles à neutrons proches, situées dans notre Galaxie. En effet, on avait observé des raies sombres dans les spectres (où le rayonnement gamma est dispersé, comme la lumière par un prisme) de certains sursauts, et les théoriciens avaient supposé que ces raies proviennent d'une émission par des électrons accélérés à des vitesses relativistes, lors de la reconnexion des lignes de champ magnétique d'une étoile à neutrons. Sur le Soleil, un phénomène similaire, quoique à des énergies moindres, déclenche les éruptions solaires.

En avril 1991, la navette spatiale *Atlantis* mit sur orbite l'Observatoire

Compton, où était embarqué un instrument d'étude des sources gamma transitoire, BATSE. En un an, BATSE infirma toutes les hypothèses. Les sursauts gamma ne se répartissaient pas le long de notre Galaxie, la Voie lactée, et ils n'émanaient pas de galaxies proches ou d'amas de galaxies. Ils se répartissaient au contraire de manière isotrope, en nombre à peu près égal dans toutes les directions du ciel (*voir la figure 6*). Cette isotropie des sources laissait toutefois le champ ouvert à de multiples possibilités, d'une origine très locale (le Système solaire), à extragalactique en passant par une origine galactique. Selon les théoriciens, dans ce dernier cas, les sursauts provenaient d'étoiles à neutrons occupant un grand halo sphérique, autour de la Galaxie.

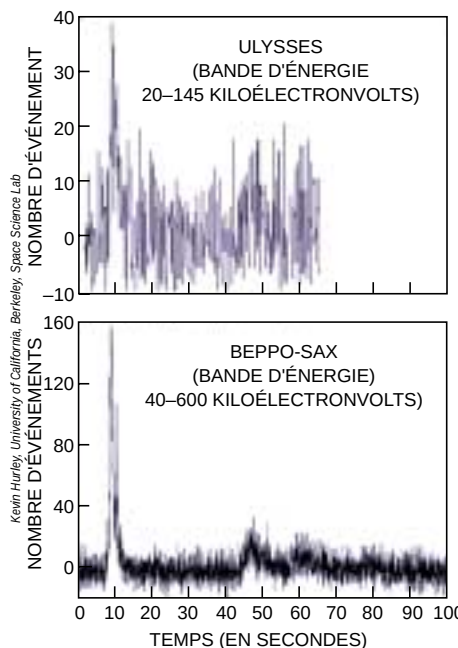
Cependant, ce dernier modèle se heurte à une difficulté majeure : la Terre se trouve à près de 25 000 années-lumière du centre de notre Galaxie. Aussi, ce halo doit être très vaste. Pour que, de la Terre, nous voyons les étoiles



sources de sursauts gamma réparties uniformément sur la voûte céleste, il doit mesurer près de 600 000 années-lumière de rayon. S'il en est ainsi, le halo de la galaxie voisine, Andromède, devait être aussi étendu et on devrait observer une concentration de sursauts dans sa direction. Or, BATSE n'a rien décelé de tel. Mais en a-t-il les moyens?

L'uniformité de la répartition des sursauts gamma a convaincu la plupart des astrophysiciens qu'ils naissent jusqu'à des distances de trois à dix milliards d'années-lumière. À de telles distances, les sursauts devraient cependant montrer les effets de l'expansion de l'Univers : les galaxies lointaines s'éloignent de la Terre à grande vitesse, car la lumière qu'elles émettent est décalée vers des fréquences inférieures, plus rouges pour les rayonnements visibles. De la même manière, les sursauts gamma devraient présenter un «décalage vers le rouge» ainsi qu'un allongement de leurs durées.

Malheureusement, BATSE n'a pas été conçu pour détecter dans le domaine des rayons gamma, les raies brillantes ou sombres qui caractérisent des éléments chimiques spécifiques et qui seraient décalées vers le rouge. En avril 1997, des astronomes utilisant le télescope *Keck*, à Hawaï, ont obtenu un spectre dans le visible de la lueur résiduelle de GRB 970228 : il est lisse et rouge, dépourvu de raies révélatrices. Toutefois, Jay Norris, du Centre spatial *Goddard* de la NASA, et Robert Mallozzi, de l'Université d'Alabama, ont analysé statistiquement les sur-



2. ÉVOLUTION TEMPORELLE du sursaut GRB 970228, mesurée par la sonde *Ulysse* (en haut) et par le satellite *Beppo-SAX* (en bas). On remarque une bouffée de photons gamma, brève et intense.

sauts observés : d'après leurs résultats, les spectres des sursauts les plus faibles, et par conséquent les plus lointains, sont dilatés temporellement et décalés vers le rouge. D'autres interprétations (controversées) existent néanmoins.

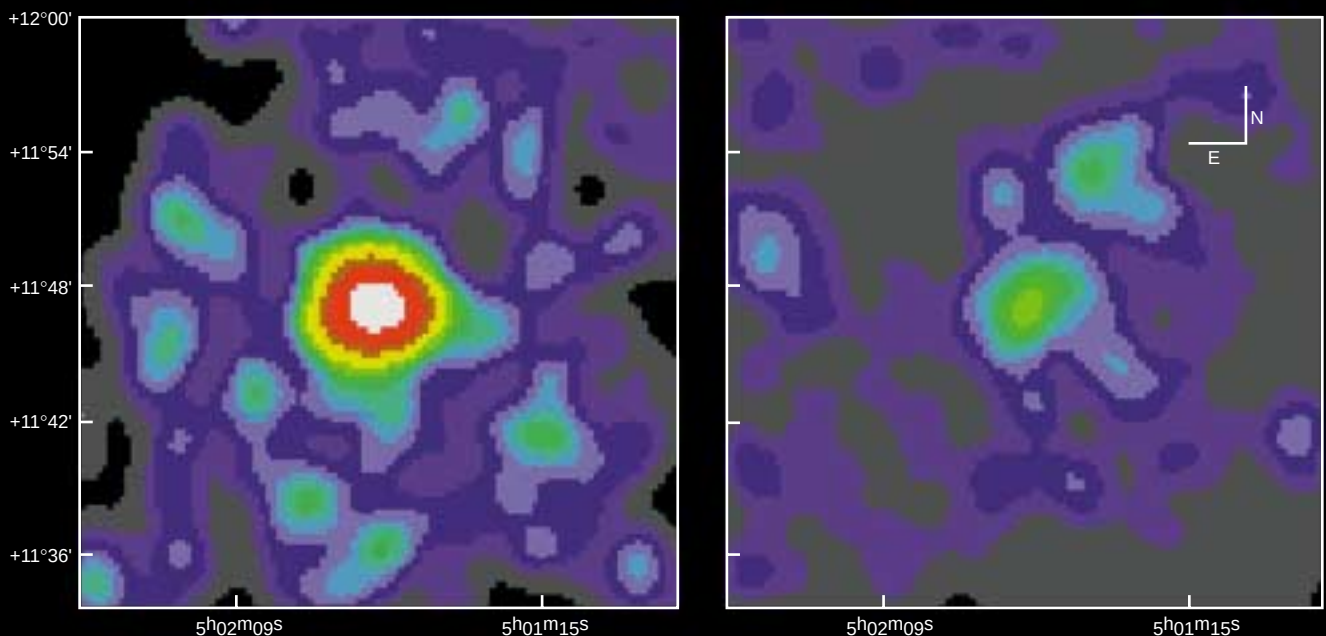
La grande variété des sursauts rend toute explication difficile. Un sursaut peut durer entre 30 millisecondes et 15 minutes – et, dans un cas, plus d'une heure et demie. La luminosité de certains sursauts varie de manière

imprédictible : on observe des bouffées de rayonnement intense sans émission détectable entre elles. D'autres sursauts décroissent continûment. Les spectres sont également compliqués. La majeure partie de l'énergie d'un sursaut est émise entre 100 000 et un million d'électronvolts, indication de la grande température de la source (l'énergie des photons situés dans le visible, principal rayonnement de notre Soleil à 6 000 °C, est de quelques électronvolts). Avec le temps, la fréquence de certains sursauts gamma diminue lentement, de sorte qu'ils émettent des rayons X. Bien que totalisant seulement un dixième de l'énergie du sursaut gamma, l'émission X comporte beaucoup de photons, car ces derniers sont moins énergétiques que les photons gamma.

Si les sursauts émanent de distances cosmologiques, leurs énergies doivent être supérieures à 10^{44} joules (il faut environ 1 joule pour soulever 100 grammes à une hauteur de un mètre). Cette énergie doit être émise en moins de quelques secondes dans une région qui mesure quelques dizaines de kilomètres de diamètre.

Quelles circonstances pourraient engendrer une telle concentration

3. GRÂCE À L'IMAGE EN RAYONS X obtenue par le satellite *Beppo-SAX* le 28 février (image de gauche), on localisa le sursaut à quelques minutes d'angle près. Au sol, les télescopes purent alors rechercher une émission dans le visible. Le 3 mars, la source s'était considérablement affaiblie (image de droite).



d'énergie? D'un point de vue énergétique, le meilleur candidat serait la coalescence d'un système binaire d'étoiles à neutrons (voir *Les systèmes doubles d'étoiles à neutrons*, par Tsvi Piran, *Pour La Science*, juillet 1995). En perdant de l'énergie gravitationnelle sous forme de rayonnement, les étoiles tombent en spirale l'une vers l'autre et fusionnent en un trou noir. Selon les estimations théoriques, ce type d'événement se produit tous les 10 000 à un million d'années dans une galaxie. Comme le volume observé par BATSE contient environ 10 milliards de galaxies et que tous les sursauts ne sont pas visibles, on estime que l'on devrait observer jusqu'à un millier de sursauts par an dans le ciel. Depuis six ans, BATSE a observé en moyenne un sursaut par jour, en accord avec les prévisions, car la Terre lui cache en permanence une partie du ciel.

Une multitude de modèles

Les autres possibilités sont nombreuses : coalescence d'un trou noir avec une étoile à neutrons, avec une étoile ordinaire, ou une naine blanche. Les débats entre partisans de ces diverses théories sont animés, mais les astrophysiciens s'accordent pour dire que la coalescence libère de formidables quantités d'énergie. La coalescence de deux étoiles à neutrons en un trou noir, par exemple, libère 10^{46} joules. Cette énergie est émise sous forme de neutrinos et d'antineutrinos qui produiraient des photons gamma. Cette production nécessite un déroulement des événements précis : le choc entre les neutrinos et les antineutrinos doit engendrer des électrons et des positons qui s'annihilent ensuite en photons. Malheureusement, ce mécanisme de conversion est peu efficace, et des simulations récentes indiquent qu'il ne produirait pas suffisamment de photons.

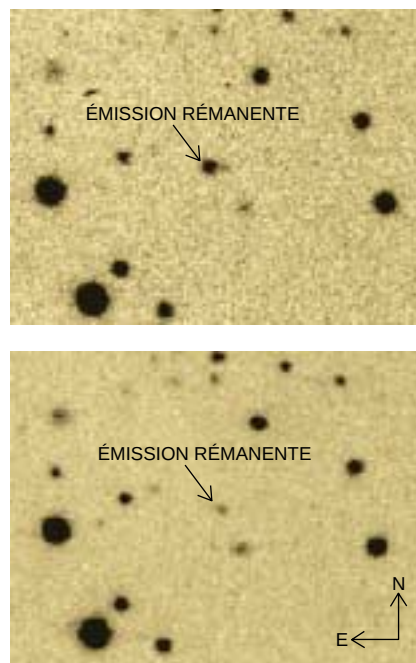
De surcroît, si la «boule de feu initiale» contient trop de particules massives, tels des protons, des interactions avec celles-ci réduisent l'énergie des photons gamma. Or, lors de la coalescence de deux étoiles à neutrons, de nombreuses particules sont émises, dont beaucoup de protons, et la majeure fraction de l'énergie est transmise aux protons, au détriment du rayonnement. Pour contourner cette

difficulté, Peter Mészáros, de l'Université de Pennsylvanie, et Martin Rees, de l'Université de Cambridge, ont proposé que la boule de feu en expansion, essentiellement composée de protons très chauds, heurte les gaz environnants et produise une onde de choc. Les électrons accélérés par les champs électromagnétiques intenses au sein de cette onde émettraient alors des rayons gamma.

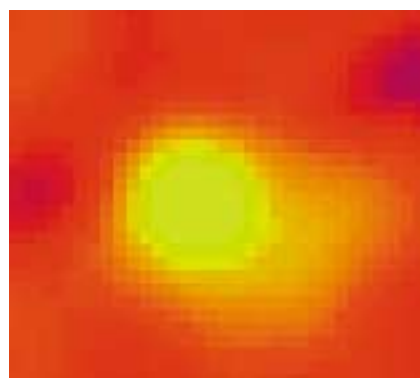
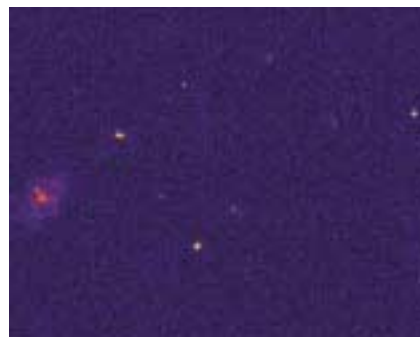
Des chocs internes qui apparaîtraient lorsque diverses parties de la boule de feu entrent en collision, à des vitesses proches de la vitesse de la lumière, engendreraient également un rayonnement gamma. Selon ces modèles de chocs, les sursauts gamma seraient suivis d'émissions rémanentes durables dans le domaine des rayons X et dans le visible. En particulier, Mario Vietri, de l'Observatoire de Rome, a prédit une persistance d'émissions X et visible un mois après le sursaut, ce qui ne serait pas le cas des modèles d'origine galactique des sursauts. Le sursaut GRB 970228 est le premier où l'on observe une telle émission rémanente. Cependant, aucun modèle fondé sur la coalescence d'un système binaire n'explique les sursauts de longue durée, tel celui de 1 100 secondes enregistré par l'instrument BATSE en 1996.

D'autres mécanismes peuvent engendrer des rayons gamma. Nir Shaviv et Arnon Dar, de l'Institut de technologie de Haïfa, proposent une interaction entre une «boule de feu» d'origine inconnue, riche en métaux lourds, et le rayonnement d'étoiles proches : des ions chauds de fer ou de nickel pourraient interagir avec le rayonnement d'étoiles proches pour émettre un rayonnement gamma. Des simulations indiquent que l'évolution des sursauts résultants est conforme aux observations, mais une boule de feu composée entièrement de métaux lourds semble irréaliste.

D'autres astrophysiciens ont proposé que les sursauts naissent dans des moteurs magnétiques extrêmement puissants, semblables aux dynamos à l'œuvre au sein des noyaux de galaxies. Au lieu de produire une boule de feu, la coalescence de deux étoiles formerait un trou noir entouré d'un disque épais de débris en rotation. Un tel disque ne survivrait que très peu de temps, mais les champs magnétiques internes seraient colossaux, environ 10^{15} fois le champ magnétique terrestre. Les



4. DES IMAGES DANS LE VISIBLE de la région du sursaut GRB 970228 furent prises par le télescope *William Herschel*, dans les îles Canaries, le 28 février (en haut) et le 8 mars (en bas). Un point lumineux dans la première image a pâli dans la seconde, sans doute une émission rémanente.



5. PHOTOGRAPHIE À LONGUE PAUSE de l'émission rémanente de GRB 970228 prise par le Télescope spatial *Hubble* le 26 mars 1997. Dans le visible, l'émission rémanente (près du centre de l'image du haut), observée en gros plan (en bas), a une forme allongée qui correspondrait à la galaxie où le sursaut se serait produit.

champs extraîraient l'énergie de rotation du système, et la canaliserait dans deux jets le long de l'axe de rotation.

Dans ces jets, les régions les plus proches de l'axe contiendraient peu de protons. Ainsi les électrons relativistes y engendreraient un rayonnement

gamma intense et localisé. Si de nombreux détails restent à régler, les théories selon lesquelles les sursauts gamma sont produits après une coalescence d'étoiles sont les plus plausibles.

Comment départager les modèles ? Si l'un des satellites détecte un sursaut

démultiplié par une lentille gravitationnelle, les astronomes auront la certitude que les sursauts se produisent à des distances cosmologiques. Une lentille gravitationnelle est une galaxie ou un autre objet céleste dont la masse courbe les rayons lumineux ; lorsque

La parole aux observateurs

C'est parce qu'ils ne se manifestent avec éclat qu'aux plus hautes énergies que les sursauts gamma constituent depuis un quart de siècle l'une des plus grandes énigmes de l'astrophysique. En raison de leurs longueurs d'onde inférieures aux distances qui séparent les atomes, il est impossible de réfléchir ou de réfracter les rayons gamma. Sans dispositifs optiques à base de miroirs et de lentilles, les astronomes peinent à déterminer avec précision la position sur la voûte céleste des sources de rayons gamma. Or, c'est un préalable indispensable à l'étude de ces sources au moyen de télescopes opérant à d'autres longueurs d'onde, et c'est surtout en menant des campagnes d'observation multi-longueurs d'onde que les astronomes espèrent comprendre un jour la nature des sources de rayons gamma cosmiques.

Dans le cas précis des sursauts gamma, la réalisation de telles campagnes d'observation se heurte en plus au caractère évanescents des émissions recherchées. Pour les traquer, un dispositif qui fournirait en temps réel la direction d'origine des sursauts gamma avec une précision d'environ une minute d'angle est nécessaire. Ainsi, l'on peut braquer très rapidement dans cette même direction les télescopes terrestres ou spatiaux les plus performants, donc à champs étroits. L'expérience BATSE, à bord de l'Observatoire *Compton*, qui détecte les sursauts gamma au rythme d'un événement par jour, ne parvient à les localiser sur la voûte céleste qu'avec une précision de quelques degrés. Il serait trop long de fouiller une telle «boîte d'erreur» avec des télescopes dont le champ se mesure en minutes d'angle ! C'est donc pour les appareils montés à bord du satellite italien *Beppo-SAX* une performance scientifique remarquable d'avoir fourni en temps quasi réel la direction d'origine d'une poignée de sursauts gamma avec une précision de quelques minutes d'angle.

À bord de *Beppo-SAX*, le mécanisme de détection est organisé de la manière suivante : dès que le moniteur de sursauts détecte l'arrivée d'une bouffée de rayons gamma entre 40 et 700 kiloélectronvolts, l'équipe scientifique qui contrôle le satellite examine les données collectées par les deux caméras néerlandaises à grand champ opérant dans la bande d'énergie voisine des rayons X entre 2 et 30 kiloélectronvolts. Ces deux caméras couvrant environ cinq pour cent de la voûte céleste, la probabilité n'est pas négligeable qu'un sursaut apparaisse dans le champ de l'une ou de l'autre. Fonctionnant sur le principe des ouvertures codées, ces deux appareils produisent des images permettant d'estimer la position des sursauts avec une précision de trois minutes d'angle.

Les opérateurs de *Beppo-SAX* manœuvrent alors le satellite afin de pointer cette direction avec deux télescopes à champ étroit qui opèrent respectivement dans les bandes des rayons X de 0,1 à 10 kiloélectronvolts et de 2 à 10 kiloélectronvolts. Forts d'un dispositif à miroir à incidence rasante, ces appareils localisent alors les sources avec une précision de 50 secondes d'angle.

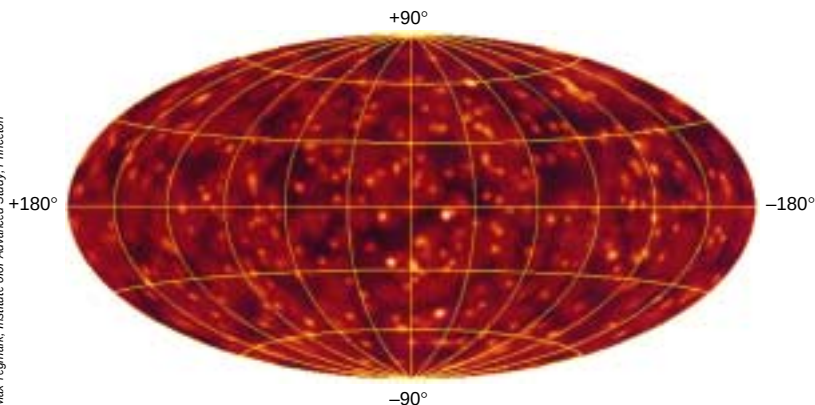
Après avoir pris, depuis plus de 20 ans, une part décisive aux observations des sursauts gamma, notamment avec les expériences françaises réalisées sous l'impulsion de Gilbert Vedrenne, par le Centre d'étude spatiale des rayonnements, à Toulouse, l'Europe se retrouve avec *Beppo-SAX* à la pointe des recherches sur les sursauts. L'expérience américaine BATSE a certes fourni un catalogue impressionnant de sursauts, mais faute de pouvoir mesurer avec précision leur direction d'arrivée, l'équipe BATSE n'a pas pu aborder la question cruciale de la nature des astres à l'origine des sursauts, autrement que par le biais d'études statistiques portant sur la répartition des événements sur la voûte céleste. Même si ces études semblent favoriser l'hypothèse d'une origine extra-galactique des sursauts, les seules données collectées par BATSE n'excluent pas la possibilité d'une origine beaucoup plus locale.

Pour séduisante qu'elle soit, l'idée que des coalescences d'étoiles à neutrons dans de lointaines galaxies soient à l'origine des sursauts gamma ne repose que sur des supputations théoriques. Aujourd'hui encore, on s'interroge pour savoir si les premières données collectées à la suite des observations de *Beppo-SAX* apportent ou non un quelconque crédit à cette hypothèse. Certains voient dans les images fournies par le Télescope spatial *Hubble* la trace d'une très lointaine galaxie coïncidant avec la source d'émission rémanente identifiée avec le sursaut du 28 février 1997. Patrizia Caraveo, de l'Institut de physique cosmique de Milan, et ses collègues, notent au contraire que, d'une image de *Hubble* à l'autre, la source se serait déplacée par rapport aux autres étoiles du champ, indiquant sa présence dans la proche banlieue galactique.

Même si *Beppo-SAX* a permis une remarquable percée scientifique, il faut se garder d'y voir le commencement de la fin du mystère lancinant des sursauts gamma, mais plutôt la fin heureuse d'une première étape où les astronomes ne pouvaient compter que sur les seules données gamma pour déterminer la nature des sites célestes à l'origine de ces formidables bouffées de rayons gamma.

Jacques PAUL

Service d'astrophysique du CEA, Saclay



6. LA RÉPARTITION DES SURSAUTS dans le ciel, mesurée par le détecteur de sursauts et de sources transitoires BATSE, n'indique pas de concentration le long de la Voie lactée (ligne horizontale sur la carte), mais une répartition uniforme. BATSE se trouve à bord de l'Observatoire Compton, que l'on voit ici en cours de déploiement.

le rayonnement d'une étoile située derrière la lentille est dévié, on observe plusieurs images de l'étoile originelle, disposées en arcs autour de la lentille. Pour l'instant cependant, la médiocre résolution spatiale des détecteurs de rayonnements gamma n'autorise pas de telles détections.

En outre, contrairement aux étoiles, les sursauts ne sont pas des sources persistantes. Un sursaut gamma démultiplié par une lentille gravitationnelle apparaîtrait comme deux sursauts provenant plus ou moins de la

même direction, possédant un spectre et une évolution semblables, mais dont les intensités et les temps d'arrivée différeraient (la différence de temps résulte de la différence de longueur des chemins empruntés par le rayonnement autour de l'objet faisant office de lentille).

Pour mieux cerner l'origine de l'explosion sous-jacente, une étude multifréquence est nécessaire. On pourrait alors découvrir la «contrepartie» du sursaut à d'autres longueurs d'onde et identifier la source, condition nécessaire à la compréhension du phénomène (*voir l'encadré ci-contre*). Jusqu'à GRB 970228, on n'avait jamais observé de contrepartie dans le visible, mais, désormais, on espère en trouver en localisant très précisément les sursauts.

Des télescopes en veille

Depuis le début des années 1970, Kevin Hurley, de l'Université de Berkeley, et Thomas Cline, du Centre *Godard* de la NASA, prônent la mise en place de réseaux internationaux pour la détection des sursauts. Ils tentent de placer un détecteur de rayonnements gamma à bord de chaque sonde spatiale ou de lancer des dispositifs spécialisés. En comparant les temps de réception d'un sursaut par deux satellites éloignés, ils espèrent le localiser à mieux que quelques minutes d'angle.

L'efficacité du réseau varie beaucoup selon le nombre d'instruments qui y prennent part et leur distance dans l'espace. Aujourd'hui, cinq composantes du réseau sont actives : BATSE, *Beppo-SAX* et le satellite militaire *DMSP*, tous trois proches de la Terre ; la sonde *Ulysse*, très loin au-dessus du plan du Système solaire ; et la sonde *Wind*, en orbite autour du Soleil. Les don-



7. DES TÉLESCOPES ROBOTISÉS sur une colline près du Laboratoire Lawrence Livermore recherchent l'émission rémanente d'un sursaut quelques secondes après avoir reçu sa localisation de BATSE.



8. PLUSIEURS INSTRUMENTS contribuent à l'étude des sursauts gamma. Le satellite *Beppo-SAX* (à gauche), que l'on voit en cours d'assemblage, possède des détecteurs de rayons gamma et X qui se sont révélés cruciaux dans la localisation de sursauts récents. Le télescope

William Herschel (au centre), dans les îles Canaries, a photographié l'émission rémanente dans le visible de GRB 970228. En mai, l'interféromètre radio VLA à Socorro, Nouveau-Mexique, a observé pour la première fois des ondes radio provenant d'un sursaut.

nées de *Beppo-SAX*, d'*Ulysse* et de *Wind* furent utilisées pour déterminer par triangulation la position de GRB 970228 (BATSE était alors dans l'ombre de la Terre).

Cette méthode de triangulation spatiale est, pour l'instant, lente à fournir la direction du sursaut (huit heures au mieux), car il faut collecter les données provenant de satellites distants. Or, le temps est crucial pour détecter un sursaut. Aussi, Scott Barthelmy, du Centre *Goddard*, a-t-il mis au point un système nommé BACODINE (réseau BATSE de distribution de coordonnées) pour diffuser en quelques secondes la position des sursauts mesurés par BATSE à des télescopes au sol.

BATSE se compose de huit détecteurs de rayonnement gamma répartis en différents points du satellite. La comparaison de l'intensité d'un sursaut mesurée par ces détecteurs fournit en quelques secondes la position à quelques degrés près. Alors même que le sursaut a lieu, le système BACODINE le localise et transmet sa position, via le réseau *Internet*, à plusieurs dizaines de sites dans le monde. Cinq secondes plus tard, des télescopes robotisés pivotent pour observer le sursaut. Malheureusement, ces télescopes robotisés sont généralement petits, de sorte qu'ils ne peuvent détecter l'émission rémanente des sursauts. Par exemple, les petits télescopes de diamètre inférieur au mètre au Laboratoire Lawrence Livermore, n'auraient pu observer l'émission rémanente de GRB 970228 (sauf si l'émission dans le visible qui suivit le sursaut avait été plusieurs fois plus intense, comme le pensent certains théoriciens). Ainsi, des télescopes 100 fois plus sensibles sont nécessaires.

Ces télescopes de taille moyenne seront pilotés par des robots, de manière à pivoter très vite, et ils explorent de vastes étendues du ciel. S'ils découvrent une émission rémanente, ils détermineront sa position avec une relativement bonne précision, ce qui permettra aux télescopes plus puissants, comme le Télescope spatial, de rechercher une émission rémanente.

La faible émission qui a persisté après GRB 970228 montre que cette stratégie peut être payante. La mission *HETE*, dirigée par George Ricker, de l'Institut de technologie du Massachusetts, doit être reconstruite et lancée dans deux ans environ. Elle observera la totalité du ciel à l'aide de détecteurs de rayons X qui localisent des sursauts gamma à quelques minutes d'angle près. Un réseau de télescopes terrestres recevra ces positions presque immédiatement et recherchera des émissions rémanentes dans le domaine visible.

Détections multifréquences

Quelle proportion de sursauts gamma possède une émission rémanente détectable? Nous l'ignorons. Le sursaut GRB 970228 pourrait être un cas isolé. De plus, même une région du ciel de quelques minutes d'angle de diamètre contient beaucoup trop d'objets faibles pour qu'il soit facile de rechercher des contreparties. L'idéal serait de déterminer des positions précises en quelques fractions de seconde après le sursaut gamma lui-même. À cette fin, les astronomes conçoivent des télescopes d'un nouveau genre qui détermineront presque instantanément la position d'un sursaut, à quelques secondes d'angle près.

Pour affiner les modèles, nous étudierons le rayonnement à des fréquences supérieures et inférieures à celles qui sont observées aujourd'hui. Le télescope de rayonnement gamma de haute énergie EGRET, également à bord de l'Observatoire *Compton*, a détecté, pour quelques sursauts, des émissions dont l'énergie atteint 10 milliards d'électronvolts, subsistant parfois pendant plusieurs heures. Dans ce domaine des hautes énergies, on attend beaucoup du télescope gamma spatial *GLAST*, en cours de mise au point par une équipe internationale. Des photons d'énergie encore supérieure – jusqu'à 10^{12} électronvolts – pourraient être détectés par de nouveaux télescopes gamma terrestres. À l'autre extrémité du spectre, les rayons X mous, qui possèdent des énergies jusqu'à un kiloélectronvolt environ, sont utiles pour tester les modèles de sursauts, ainsi que pour mieux fixer leur position. Entre 0,1 et 10 kiloélectronvolts, il est fort possible que l'on découvre des raies d'absorption et d'émission qui nous informeraient sur la boule de feu sous-jacente ainsi que sur le champ magnétique. De telles raies pourraient aussi donner une mesure directe du décalage spectral de cette boule et, par conséquent, de sa distance. Trois équipes construisent aujourd'hui des instruments sensibles pour la détection des rayons X mous : le télescope européen *XMM* devrait être lancé en 1999 tandis que le télescope américain *AXAF* et le russe *Spectrum-X-gamma* (SXG) devraient être lancés d'ici quelques années.

Les progrès sont toutefois rapides : alors que nous finissons cet article, nous avons appris une nouvelle détection. Dans la nuit du 8 mai, les opérateurs de *Beppo-SAX* ont localisé un sursaut

d'une durée de 15 secondes. Immédiatement après, Howard Bond, de l'Institut du Télescope spatial, à Baltimore, a photographié la région au moyen du télescope optique de 0,9 mètre de Kitt Peak ; la nuit suivante, un point lumineux dans le champ s'était intensifié. D'autres télescopes confirment qu'après être passée par un maximum d'éclat le 10 mai, la source faiblissait. C'est la première fois qu'on observe un sursaut dont l'image dans le visible croît vers un maximum – lequel, étonnamment, s'est produit quelques jours après le pic gamma.

Pour la première fois également, l'interféromètre radio VLA, au Nouveau-Mexique, a détecté des ondes radio provenant de la contrepartie du sursaut. Plus étonnant encore, le spectre principalement bleu de ce sursaut, analysé le 11 mai avec le télescope *Keck II* de Hawaïi, contenait quelques raies d'absorption dues au fer et au magnésium d'un nuage situé entre la source et la Terre. Le décalage spectral de ces raies indique que la source se situerait à plus de sept milliards d'années-lumière. Si cette interprétation est confirmée, elle établira définitivement que les sursauts gamma se produisent à des distances cosmologiques. Peu de temps s'écoulera alors avant que nous puissions préciser quel événement catastrophique a déclenché ce sursaut.

Gerald FISHMAN, de la NASA, est le responsable principal de l'instrument BATSE. Dieter HARTMANN est astrophysicien théoricien à l'Université Clemson, en Caroline du Sud.

Jacques PAUL et Philippe LAURENT, *Astronomie gamma spatiale*, Gordon & Breach, 1997.

D. KNIFFEN, *The Gamma-Ray Universe*, in *American Scientist*, vol. 81, n° 4, pp. 342-350, juillet 1993.

Les trous noirs, dossier *Pour la Science*, 1997.

Neil GEHRELS, Carl E. FICHTEL, Gerald J. FISHMAN, James D. KURFESS et Volker SCHÖNFELDER, *L'observatoire Compton*, in *Pour la Science*, février 1994.

G.J. FISHMAN et C.A. MEEGAN, *Gamma Ray Bursts*, in *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 33, pp. 415-458, 1995.

La page d'accueil de la mission *Beppo-SAX* est sur le site de *Pour la Science* : <http://www.pourlascience.com>

Les xénotransplantations

ROBERT LANZA • DAVID COOPER • WILLIAM CHICK

Depuis plusieurs dizaines d'années, le nombre d'organes prélevés sur des donneurs décédés est insuffisant pour tous les patients qui attendent de bénéficier d'une transplantation. Des organes humanisés provenant d'animaux deviendront peut-être une source d'organes salvateurs.

Il sera une fois... une équipe de chirurgiens qui prélèvera le cœur, les poumons, les reins et le pancréas d'un donneur. Les organes seront placés dans de la glace et un émissaire se précipitera à l'aéroport voisin. Quelques heures plus tard, le cœur et le foie arriveront à Lille, les reins à Strasbourg, les poumons et le pancréas à Marseille. Transportés à vive allure vers les centres hospitaliers de ces villes, ces organes seront immédiatement transplantés sur des malades, certains dans un état désespéré. Les organes fonctionneront bien : six personnes seront ainsi sauvées. Dans la même journée, plusieurs hôpitaux répartis dans tout le pays recevront aussi d'autres organes prélevés dans le même centre. Plus d'une vingtaine de transplantations seront pratiquées, chaque jour, en France.

Comment ce rêve deviendrait-il réalité? Qui seront les donneurs? Ce ne seront pas des hommes, mais des porcs : si un tel miracle de la médecine n'est pas encore réalisable aujourd'hui, les biologistes progressent. Heureusement, car il n'y aura jamais assez d'organes humains disponibles pour que la demande soit satisfaite. Aujourd'hui, dans chaque pays, des milliers de personnes attendent une transplantation de cœur, de foie, de rein, de poumon ou de pancréas, et des milliers d'autres luttent contre des maladies que l'on traitera peut-être un jour par une greffe de tissus ou de cellules. Ce devrait être le cas pour l'hémophilie, le diabète, et même pour les maladies d'Alzheimer et de Parkinson. Plusieurs équipes tentent de mettre au point des méthodes de xénotransplantation, c'est-à-dire de transplantation de cellules et d'organes d'animaux sur l'homme.

Association d'espèces

Associer des éléments d'espèces différentes est un fantasme ancien : il y a plus de 3 000 ans, les Grecs imaginaient les centaures, mi-hommes, mi-chevaux, et les chimères, monstres à tête et poitrail de lion, à ventre de chèvre et à queue de dragon. Dès 1682, un médecin russe consolidait le crâne d'un noble, blessé, en utilisant un os de chien et, au début du XX^e siècle, des médecins tentaient de plus en plus régulièrement de greffer sur l'homme des tissus provenant d'animaux. En 1905, un chirurgien français essayait, par exemple, de greffer des tranches de rein de lapin chez un enfant qui souffrait d'une insuffisance rénale. Les tissus greffés semblaient fonctionner, mais l'enfant mourut deux semaines après l'opération.

Pendant une vingtaine d'années, d'autres médecins tentèrent de transplanter des organes prélevés sur des porcs, des chèvres, des agneaux et des singes. Toutes ces greffes échouaient, sans que l'on comprenne pourquoi. Jusqu'aux travaux de Peter Medawar, à Londres, pendant les années 1940, les médecins ignoraient tout de l'immunologie des rejets de greffes. En 1960, Medawar partagea le prix Nobel de physiologie et médecine avec Franck Burnet.

Devant tous ces échecs, beaucoup de médecins se sont désintéressés des transplantations. Certains ont toutefois persévéré et, en 1954, Joseph Murray et ses collègues de l'hôpital Peter Bent Brigham, à Boston, ont réussi la première transplantation de rein entre deux vrais jumeaux : le système immunitaire de deux jumeaux identiques ne différencie pas leurs

organes. Ensuite, on a commencé à transplanter des reins prélevés sur des parents plus éloignés, ou même sur des donneurs qui n'étaient pas apparentés, en administrant des traitements immunosuppresseurs, des médicaments qui inhibent les réactions immunitaires du receveur.

Depuis, les pratiques chirurgicales se sont perfectionnées, et l'on transplante aujourd'hui des cœurs, des poumons, des foies et des pancréas. Malheureusement, à peine la moitié des malades en attente d'une transplantation peut être traitée, en raison du petit nombre d'organes disponibles. La pénurie ne cessera de s'accroître à mesure que les médecins amélioreront leurs techniques. C'est par exemple le cas du diabète : il serait plus aisé de greffer les cellules pancréatiques qui produisent l'insuline plutôt que de transplanter un pancréas entier, même si les différents patients doivent être traités par des cellules provenant de nombreux donneurs différents.

En fait, les médecins n'ont jamais abandonné l'idée de greffer des tissus d'animaux sur l'homme. Pendant les années 1960, ils ont cherché à comprendre pourquoi les greffes d'organes entre espèces étaient si rapidement rejetées : ils ont découvert que le sang du receveur contient des anticorps qui se lient immédiatement aux tissus greffés. Ces anticorps sont dirigés contre tous les éléments étrangers à l'organisme : normalement ils aident le système immunitaire à lutter contre les micro-organismes infectieux, mais, dans le cas d'une transplantation, ils se dressent contre l'organe greffé. La fixation de ces anticorps active des protéines sanguines particulières, les protéines du complément,