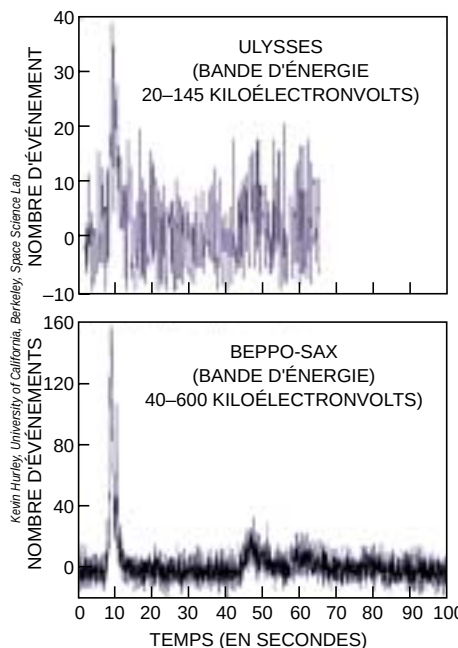


sources de sursauts gamma réparties uniformément sur la voûte céleste, il doit mesurer près de 600 000 années-lumière de rayon. S'il en est ainsi, le halo de la galaxie voisine, Andromède, devait être aussi étendu et on devrait observer une concentration de sursauts dans sa direction. Or, BATSE n'a rien 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.

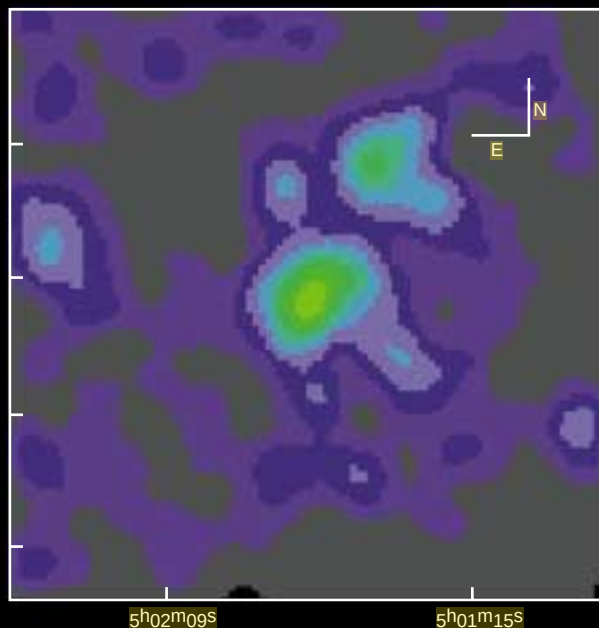
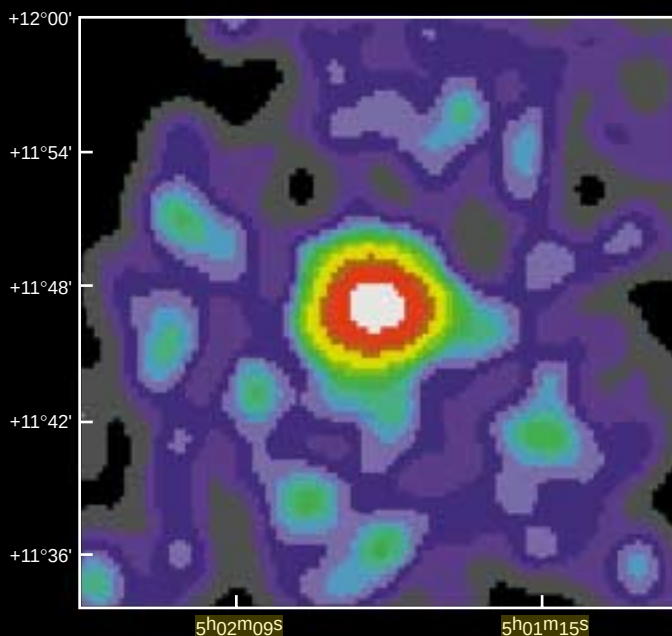
La grande variété des sursauts rend toute explication difficile. Un sursaut peut durer entre 30 millisecondes et 15 minutes – et, dans un cas, plus d'une heure et demie. La luminosité de certains sursauts varie de manière

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.

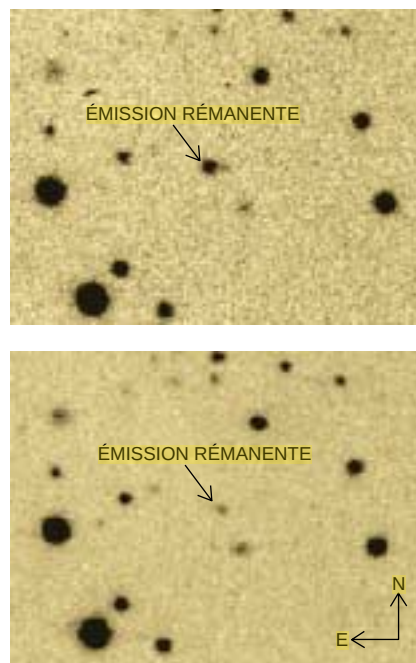
De surcroît, si la «boule de feu initiale» contient trop de particules massives, tels des protons, des interactions avec celles-ci réduisent l'énergie des photons gamma. Or, lors de la coalescence de deux étoiles à neutrons, de nombreuses particules sont émises, dont beaucoup de protons, et la majeure 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 produisent une onde de choc. Les électrons accélérés par les champs électromagnétiques intenses au sein de cette onde émettraient alors des rayons gamma.

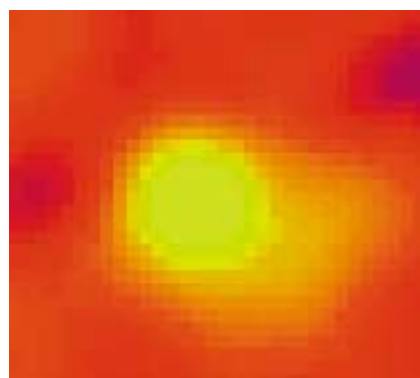
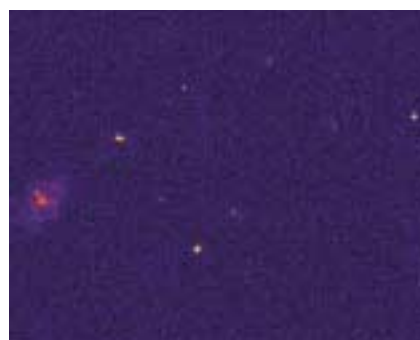
Des chocs internes qui apparaîtraient lorsque diverses parties de la boule de feu entrent en collision, à des vitesses proches de la vitesse de la lumière, engendreraient également un rayonnement gamma. Selon ces modèles de chocs, les sursauts gamma seraient suivis d'émissions rémanentes durables dans 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