

Les sursauts gamma

Les sursauts gamma ont été découverts par hasard il y a plus de 30 ans par des satellites militaires américains espionnant les essais nucléaires soviétiques. A partir de 1992, les observations de l'expérience BATSE embarquée à bord du gros satellite d'observation du ciel gamma « Compton Gamma Ray Observatory » ont bouleversé nos idées sur les sursauts en montrant qu'ils étaient peut-être situés aux confins de l'univers.

La confirmation définitive est venue avec un autre satellite, « Beppo-SAX », qui a permis la découverte des « rémanences » qui prolongent l'émission gamma dans les domaines X, visible et radio. Les modèles théoriques tentent aujourd'hui d'expliquer les sursauts par des processus se produisant dans des écoulements relativistes collimatés, au voisinage d'un disque d'accrétion entourant un trou noir.

HISTORIQUE

Les sursauts gamma sont des éclairs de rayonnement gamma, à la fois brefs et très puissants, qui atteignent chaque jour la terre. L'origine de ce phénomène astrophysique remarquable est restée longtemps mystérieuse puisque c'est seulement à partir de 1997 que les astrophysiciens ont véritablement espéré résoudre l'énigme posée par ces sources qui les intriguaient depuis le début des années 1970. Ces longues années d'études et d'observations ont donné lieu à de multiples tâtonnements, fausses pistes et rebondissements et représentent sans doute l'un des feuilletons scientifiques les plus passionnants de la fin du 20^e siècle, illustrant parfaitement les incertitudes de la recherche scientifique.

La découverte proprement dite des sursauts a été le fruit du hasard. Ce sont les satellites militaires américains de la série Vela lancés à la fin des années 1960 qui, les premiers, observèrent des bouffées intenses de rayons gamma en provenance de l'espace. Après quelques années d'observation, et ayant constaté que ces événements provenaient bien de sources célestes et non d'explosions nucléaires provoquées par l'homme

dans l'espace, les militaires confièrent le problème aux astrophysiciens...

Dès la parution en 1973 du premier article mentionnant la découverte des sursauts, plusieurs groupes aux États-Unis, en France et en ex-Union soviétique se lancèrent dans la réalisation de détecteurs pour les observer. Dans la lignée des détecteurs militaires, les instruments scientifiques des années 1980 et 1990 étaient relativement simples. Ils ne fournissaient pas d'emblée la direction des sursauts, mais deux techniques permettaient de la reconstruire *a posteriori*. La première donnait une idée grossière de la direction des sources par la comparaison des flux de photons tombant sur des détecteurs ayant des orientations différentes. Elle a été longtemps utilisée par les Russes, puis plus récemment par les Américains avec l'expérience BATSE. La seconde était fondée sur la mesure exacte du temps d'arrivée du sursaut sur plusieurs satellites répartis dans le système solaire. Cette seconde méthode offrait une précision bien supérieure (de l'ordre de la minute d'arc), mais elle avait l'inconvénient de faire appel aux données de plusieurs satellites (d'équipes souvent concurrentes), ce qui explique qu'un délai de plusieurs semaines était en général requis pour obtenir les positions finales. En France, le CESR (Centre d'étude spatiale des rayonnements) s'est impliqué dans cette seconde voie dès 1974 avec pour

objectif l'obtention de positions fiables. Ces travaux ont abouti, à la fin des années 1980, à la publication d'un important catalogue de positions précises de sources.

Malgré ces efforts, les sursauts gamma ne semblaient associés à aucun type d'objets déjà connus (pulsars, quasars, sources X, étoiles variables). Les recherches menées dans les domaines optique et radio à la position des sursauts restaient vaines, comme si une fois l'événement passé, rien ne subsistait de la source qui l'avait produit... Une autre observation qui troublait les astrophysiciens était l'isotropie de la distribution des sursauts sur le ciel. Cette distribution posait un problème car elle ne reflétait pas la célèbre structure aplatie de notre galaxie. Il fallait donc supposer que les sursauts se produisaient dans notre environnement immédiat (à quelques centaines de parsecs, $\approx 3 \times 10^{18}$ m, du soleil, tout au plus). Les modèles les plus en vue pour les expliquer invoquaient une accrétion très lente sur des étoiles à neutrons, suivie d'un flash violent de la matière accrétée. Mais alors pourquoi ne voyait-on pas en rayons X la luminosité produite durant la phase d'accrétion alors que ce domaine d'énergie avait déjà permis la découverte de plusieurs populations nouvelles d'étoiles à neutrons dans toute la galaxie ?

En dépit de ces interrogations, la majorité des astrophysiciens demeurent

– Laboratoire d'astrophysique de Toulouse, 14 avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse.

– Institut d'astrophysique de Paris, 98 bis boulevard Arago, 75014 Paris.

rait convaincue qu'un lien finirait par être établi entre les sursauts et une sous-population particulièrement discrète d'étoiles à neutrons (ou de trous noirs) de notre galaxie. C'est pourquoi les premières observations de BATSE étaient attendues avec impatience. Cet instrument, placé sur le gros satellite américain d'astronomie gamma Compton Gamma Ray Observatory, lancé en 1991, emportait des détecteurs 10 à 20 fois plus sensibles que tous ceux qui avaient volé auparavant. Il ne faisait aucun doute que si les sursauts étaient situés dans notre galaxie, BATSE les détecterait dans un grand volume et produirait enfin une carte les montrant concentrés dans le plan du disque galactique...

LES OBSERVATIONS

Propriétés globales

Les premiers résultats de BATSE tombèrent environ six mois après le lancement. La carte de la distribution sur le ciel des 153 premiers sursauts (BATSE détectait environ un événement par jour) fut publiée dans le journal *Nature* en janvier 1992. Elle ne laissait pas plus entrevoir la structure galactique que toutes celles qui l'avaient précédée. Après la publication de ces observations, il fallut donc abandonner définitivement l'hypothèse d'une origine des sursauts dans le disque de notre galaxie. A la fin de la mission, après neuf ans de fonctionnement, le nombre de sursauts vus par BATSE dépassait 2 700 et la carte obtenue (figure 1) ne montrait toujours aucun écart significatif à l'isotropie.

Les données de BATSE contenaient par ailleurs une autre information importante, relative cette fois à la distribution des sursauts en fonction de la distance. A l'aide de plusieurs tests statistiques différents, il fut en effet possible de mettre en évidence un manque d'événements faibles par rapport à l'hypothèse simple de sursauts uniformément répartis dans un espace euclidien.

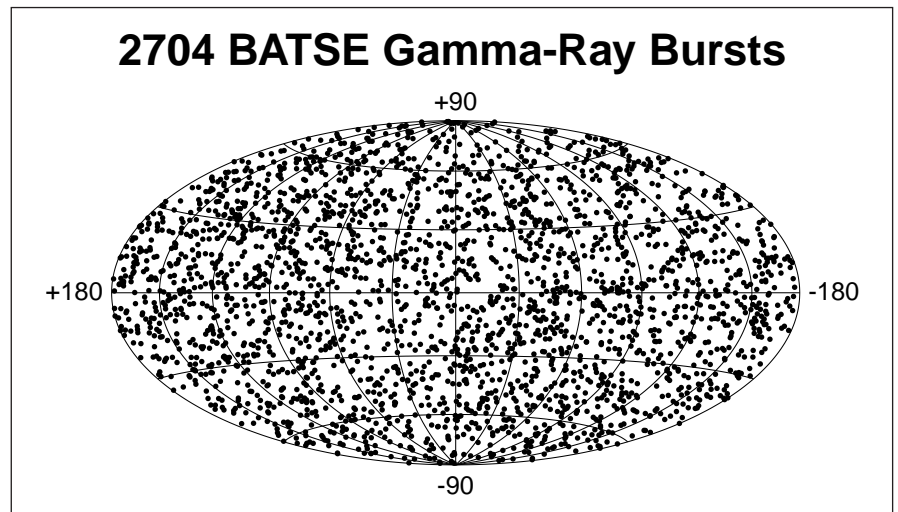


Figure 1 - Distribution sur le ciel des 2 704 sursauts détectés par l'expérience BATSE qui a fonctionné pendant neuf ans et enregistré environ un sursaut par jour. La distribution est parfaitement isotrope et ne montre aucune accumulation des sources dans le plan galactique (l'axe horizontal sur cette figure).

Cette situation pouvait s'interpréter de deux façons différentes : la première consistait à supposer que les sursauts restaient des objets relativement proches appartenant à un grand halo sphérique centré sur notre galaxie. La position du soleil à 8 kpc du centre galactique imposait cependant à ce halo d'avoir un rayon dépassant 100 kpc de manière à préserver la quasi-isotropie de la répartition des sources sur le ciel. Le défaut d'événements faibles traduisait alors simplement la diminution du nombre de sources à la périphérie du halo. L'autre possibilité était bien sûr de placer les sursauts à distance cosmologique (c'est-à-dire à 10 milliards d'années-lumière ou plus). L'isotropie était alors naturellement expliquée et le manque de sursauts faibles provenait d'effets cosmologiques à des décalages vers le rouge z dépassant 0,5 (un rayonnement de longueur d'onde λ_0 émis par une source située à un décalage z est observé à une longueur d'onde plus grande $\lambda = (1 + z)\lambda_0$; $z = 0,5$ correspond à une distance de 9,4 milliards d'années-lumière dans les modèles cosmologiques en faveur aujourd'hui).

Le débat entre tenants de ces deux explications resta vif pendant cinq ans avant, qu'en 1997, les observa-

tions du satellite « Beppo » SAX ne conduisent à la première mesure directe de distance pour un sursaut et ne confirment l'hypothèse des distances cosmologiques.

Propriétés temporelles

Les sursauts gamma sont des événements intrinsèquement courts mais dont la durée couvre malgré tout six ordres de grandeur, depuis quelques millisecondes jusqu'à mille secondes environ. L'histogramme des durées présente deux pics bien définis, le premier autour de quelques dixièmes et le second autour de quelques dizaines de secondes. Cette séparation nette pourrait indiquer des origines différentes pour les sursauts courts et les sursauts longs, mais cette question reste encore largement débattue.

Les profils temporels des sursauts montrent par ailleurs une très grande diversité (figure 2). Certains présentent une évolution simple avec un pulse unique d'intensité. D'autres sont beaucoup plus complexes avec une succession de pics bien séparés ou, au contraire, se chevauchant partiellement.

La variabilité temporelle est rapide et peut se manifester à de nombreuses échelles à l'intérieur

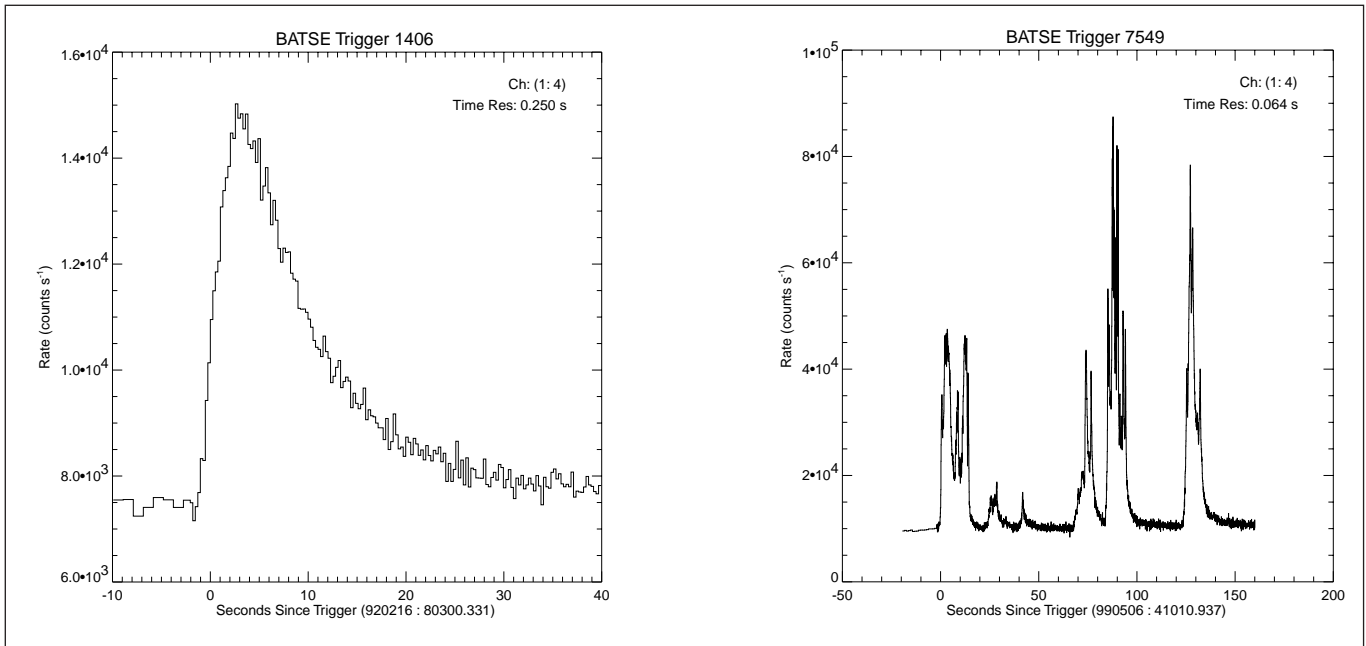


Figure 2 - Exemples de profils de sursauts gamma montrant dans certains cas un pulse unique caractérisé par une montée rapide et une décroissance plus lente ou, au contraire, une évolution complexe mais qui peut le plus souvent s'interpréter comme une superposition de plusieurs pulses élémentaires.

d'un même sursaut. Dans certains cas, elle atteint le niveau de la milli-seconde.

Propriétés spectrales

Le spectre des sursauts gamma est non thermique, c'est-à-dire qu'il ne correspond pas à celui d'un corps noir, ni à celui d'une superposition de corps noirs de températures différentes. Entre 10 keV et quelques MeV, il est, dans la majorité des cas, caractérisé par deux lois de puissance à basse et haute énergie

$$N(E) \propto E^{-\alpha} \text{ pour } E \lesssim E_0$$

$$N(E) \propto E^{-\beta} \text{ pour } E \gtrsim E_0$$

où $N(E)$ est la densité de flux des photons reçus (en photons.cm⁻²s⁻¹ MeV⁻¹). Les valeurs typiques des indices spectraux α et β sont $0,6 \lesssim \alpha \lesssim 1,5$, $2 \lesssim \beta \lesssim 4$ et l'énergie de transition E_0 est de l'ordre de quelques centaines de keV (figure 3). Au-dessus de 500 keV, seule une fraction des sursauts émet de manière notable et dans quelques cas le spectre en loi de puissance se poursuit au-delà de 10 MeV.

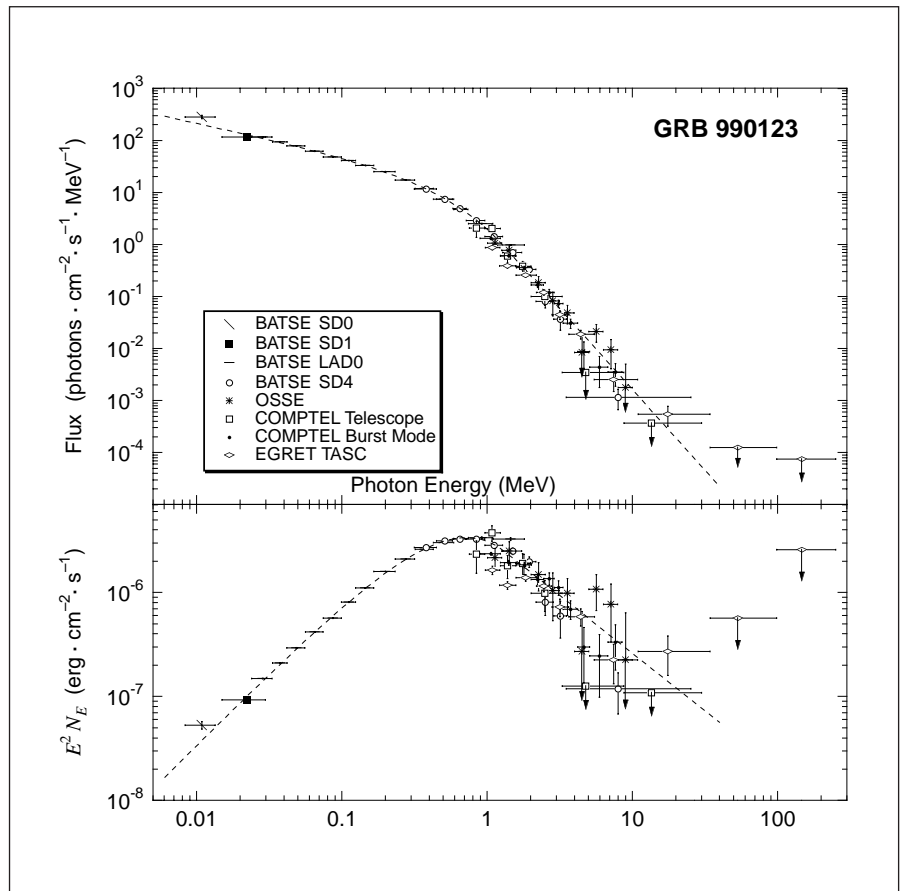


Figure 3 - Spectre du sursaut GRB 990123 obtenu par les divers instruments à bord de Compton GRO. Le flux N_E de photons reçus par cm², par seconde et par MeV ainsi que le produit $E^2 N_E$ sont représentés en fonction de l'énergie E . A basse et haute énergie, on observe des comportements en loi de puissance de pentes respectives $\alpha = 0.6$ et $\beta = 3.11$. La transition s'effectue pour une énergie $E_0 \sim 700$ keV (maximum de $E^2 N_E$).

A beaucoup plus haute énergie, quelques sursauts ont été détectés par l'expérience EGRET également à bord du satellite Compton GRO. Des photons de plusieurs GeV ont été observés parfois longtemps après la fin de l'émission gamma classique. Le record en ce domaine appartient à GRB 940217¹ où un photon de 18 GeV a été détecté 5 000 s après la fin du sursaut. A plus basse énergie, l'émission X prolonge l'émission gamma tout en continuant à suivre un spectre proche d'une loi de puissance. En revanche, aucune information n'existe sur les domaines UV et X très mou et ce n'est que dans le visible que des observations sont à nouveau disponibles.

Liens entre les propriétés temporelles et les propriétés spectrales

La recherche de liens entre les propriétés temporelles et les propriétés spectrales des sursauts revêt une grande importance car celles-ci fournissent souvent des tests contraignants pour les modèles. La relation la mieux établie représente la dureté des sursauts en fonction de leur durée. La dureté est définie comme le rapport du nombre de photons reçus dans deux bandes d'énergie différentes. La figure 4 montre ainsi les résultats de l'expérience PHEBUS qui utilise les bandes 120-320 keV et 320-7000 keV. Une nette distinction apparaît, séparant les sursauts courts (de durée $t < 2$ s) qui sont globalement plus durs que les sursauts longs ($t > 2$ s).

Les contreparties à plus basse énergie

Pendant la période qui suivit l'annonce des résultats de BATSE, il devint clair que la controverse qui persistait sur l'échelle de distance ne

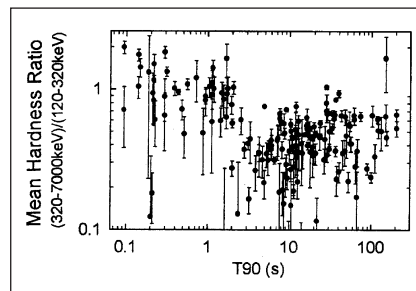


Figure 4 - Relation durée-dureté des sursauts observés par l'expérience PHEBUS. La dureté est calculée à partir des bandes 120-320 keV et 320-7000 keV. On observe une différence bien marquée entre les sursauts courts (de durée < 2 s) et les sursauts longs (> 2 s), les premiers étant nettement plus durs que les seconds.

pourrait être levée que par la spectroscopie précise, dans le domaine visible, de sources associées aux sursauts. La recherche précoce de ces contreparties optiques à partir des observations gamma était virtuellement impossible en raison de l'incertitude sur la position des sursauts (plusieurs degrés pour BATSE). Les localisations plus précises obtenues par triangulation entre plusieurs satellites étaient quant à elles disponibles trop tardivement pour détecter une source rapidement déclinante. Le satellite italo-néerlandais « Beppo » SAX (du nom du physicien italien Giuseppe « Beppo » Occhialini) lancé en avril 1996 a enfin permis de résoudre le problème. Doté à la fois d'un détecteur de sursauts gamma et de télescopes X, il tirait parti de la résolution voisine de la minute d'arc accessible dans le domaine X pour donner en moins d'une heure la position précise des sursauts qu'il détectait. Il devenait alors possible de rechercher une contrepartie optique à l'aide de grands télescopes et la première fut effectivement découverte le 28 février 1997. Il s'agissait d'un objet initialement de magnitude 21 mais faiblissant rapidement (la magnitude est une échelle logarithmique de flux : elle augmente d'une unité quand le flux d'un objet est divisé par 2,5. L'œil nu perçoit les étoiles jusqu'à la magnitude 5). Le flux déclinait en suivant une loi de puis-

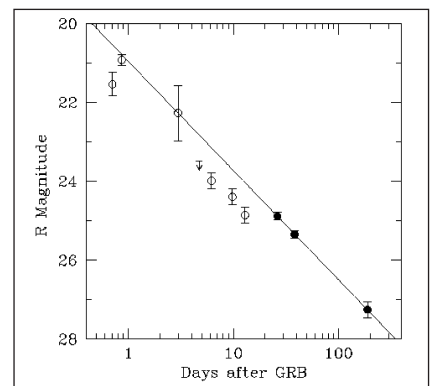


Figure 5 - Courbe de lumière dans la bande R (rouge) de la rémanence du sursaut GRB 970228. La magnitude étant une échelle logarithmique, la décroissance du flux suit une loi de puissance, ici de pente $-1,2$.

sance $F \propto t^{-1,2}$ en accord avec des prédictions théoriques antérieures à l'observation (figure 5).

La contrepartie était entourée d'une nébulosité à peine visible qui, s'il s'agissait de la galaxie hôte du sursaut, indiquait que l'objet se trouvait à très grande distance. L'hypothèse d'une origine cosmologique des sursauts était confortée mais il manquait encore une preuve plus directe.

Celle-ci est venue deux mois plus tard avec l'observation du sursaut GRB970508. Le spectre de sa contrepartie optique obtenu avec le télescope Keck II (de 10 m de diamètre) a en effet montré la présence de fines raies d'absorption du fer et du magnésium affectées d'un décalage vers le rouge $z = 0,835$. Ces raies sont la trace de la présence sur la ligne de visée de gaz appartenant probablement à la galaxie hôte, située à plusieurs milliards d'années-lumière. Depuis lors, une trentaine d'autres décalages ont été mesurés entre $z = 0,17$ et $z = 4,5$, confirmant l'échelle de distance cosmologique pour les sursauts.

Les contreparties découvertes grâce à « Beppo » SAX correspondent à des émissions postérieures au sursaut gamma proprement dit et ont été baptisées « afterglows » par les Anglo-saxons (mot qui sera traduit ici par « rémanence »). Selon les

1. La notation utilisée donne la date du sursaut. Ainsi GRB 940217 est le sursaut (Gamma-Ray Burst) du 17 février 1994.

cas, elles peuvent être étudiées pendant quelques jours à quelques mois avant de devenir inobservables.

Un autre type de contrepartie optique fut enfin découvert sur le sursaut GRB990123 situé à $z = 1,6$. Moins de 5 secondes après sa découverte par BATSE, et grâce à un réseau d'alerte sophistiqué, il put être visé par une caméra automatique à grand champ qui enregistra une émission de lumière visible atteignant la magnitude 9. Si le sursaut s'était trouvé dans notre galaxie, à une distance de 1 000 années-lumière par exemple, son éclat aurait dépassé pendant quelques secondes celui du soleil !!! Cette émission très précoce, contemporaine de l'émission gamma, n'a été vue qu'à une seule occasion et son origine reste mal comprise.

LES MODÈLES THÉORIQUES DE SURSAUTS GAMMA

Contraintes de base sur les modèles

Les données accumulées par l'expérience BATSE et la confirmation de l'échelle de distance cosmologique ont révolutionné les idées théoriques concernant les sursauts gamma. Considérés pendant près de 20 ans comme appartenant à notre galaxie, ils sont aujourd'hui rejetés à distance cosmologique et deviennent ainsi les objets les plus brillants de l'univers !

Avant toute discussion détaillée d'un scénario théorique pour les sursauts gamma, il est possible d'énoncer un certain nombre de contraintes de base qui devront être satisfaites par tous les modèles. Tout d'abord, la variabilité observée des profils temporels jusqu'à l'échelle de la milliseconde indique que les sources des sursauts doivent être des objets compacts, seuls capables de présenter une dynamique suffisamment rapide.

La seconde contrainte est simplement liée à la formidable quantité d'énergie E_γ rayonnée par les sur-

sauts. A partir de quelques événements à décalage cosmologique z connu, il est possible de déduire la valeur de $E_\gamma \sim [10^{44} - 10^{47}]$ joules $\times (\frac{\Omega}{4\pi})$, où Ω est l'angle solide dans lequel l'énergie est focalisée. Certaines indications tirées de l'observation des rémanences laissent penser que les sursauts les plus extrêmes pourraient être les plus focalisés, ce qui limiterait la valeur de E_γ à un intervalle plus restreint, peut-être entre 10^{44} et 10^{45} joules. Cette énergie est libérée en quelques secondes, ce qui conduit à des luminosités jusqu'à 15 ordres de grandeur supérieures à la limite d'Eddington (la limite d'Eddington correspond à la luminosité au-delà de laquelle la force exercée par la diffusion Thomson des photons sur les électrons dépasse la force de gravité de l'objet). Les sources produisant les sursauts gamma ne peuvent donc rayonner à partir d'une enveloppe statique. Au contraire, l'émission doit provenir d'un vent « soufflé » par le rayonnement. De plus, ce vent doit atteindre une vitesse relativiste, nécessaire pour s'affranchir du problème dit de « compacité ». Celui-ci s'énonce de la manière suivante : le spectre observé des sursauts gamma s'étendant souvent au-delà de 511 keV, la production massive de paires électron-positron à partir des photons les plus énergétiques est susceptible de rendre la source opaque à son propre rayonnement. Dans le cas d'une émission à partir d'un vent relativiste de facteur de Lorentz Γ (où $\Gamma = 1/\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$, v étant la vitesse du vent), le seuil à 511 keV pour la création des paires dans le repère propre du vent correspond à des photons observés à une énergie $E = \Gamma \times 511$ keV. Si le facteur de Lorentz est élevé, ces photons sont très peu nombreux ce qui permet de résoudre le problème de compacité. En pratique, des calculs détaillés montrent que des valeurs de

Γ supérieures à 100 sont probablement nécessaires.

Les sources de sursauts gamma

Parmi les sources invoquées pour expliquer les sursauts, les plus discutées aujourd'hui sont, d'une part, la coalescence d'objets compacts (étoiles à neutrons ou trous noirs) et, d'autre part, l'effondrement d'étoiles massives en trous noirs.

Bien que ces sources soient très différentes, elles conduisent finalement à la formation du même type d'objet résultant – un trou noir entouré d'un disque épais – avec une masse de disque allant de quelques dixièmes de masse solaire pour la coalescence de deux étoiles à neutrons jusqu'à plusieurs dizaines de masses solaires pour l'effondrement d'une étoile massive. Une autre différence importante est qu'en raison du temps de vie très court (quelques millions d'années) des étoiles massives, les sursauts qu'elles produisent sont attendus au cœur des régions de formation d'étoiles. A l'inverse, les binaires d'objets compacts ne forment de sursaut qu'après le long temps mis par les deux composantes pour se rapprocher par émission de rayonnement gravitationnel (typiquement plusieurs 10^8 ans). Cela permet au système de quitter les régions de formation d'étoiles et même d'atteindre les zones périphériques de sa galaxie d'origine. L'observation de la position des contreparties optiques de sursauts gamma dans leur galaxie hôte paraît favoriser les étoiles massives, mais il est sans doute trop tôt pour éliminer définitivement les coalescences, en particulier pour les sursauts les plus courts dont aucune contrepartie optique n'a été détectée jusqu'ici.

Un scénario en trois étapes

La plupart des modèles proposés pour expliquer les sursauts gamma comportent trois étapes bien identifiées : (1) un « moteur central » produit un écoulement relativiste de fac-

teur de Lorentz élevé (> 100) confiné dans un cône dont l'ouverture peut être variable d'un événement à l'autre ; (2) une partie de l'énergie cinétique de l'écoulement est dissipée dans des ondes de choc puis rayonnée dans le domaine gamma, ce qui conduit au sursaut observé ; (3) plus tardivement, l'énergie dissipée dans le freinage de la matière éjectée par le milieu environnant est à l'origine de la rémanence.

Ces trois étapes peuvent être traitées de manière presque indépendante. Un écoulement relativiste est nécessaire à la formation du sursaut mais l'émission gamma peut être

calculée sans qu'il soit nécessaire de comprendre comment cet écoulement est produit. Le freinage par le milieu extérieur est quant à lui le plus souvent découplé de la phase d'émission gamma et peut aussi être discuté séparément.

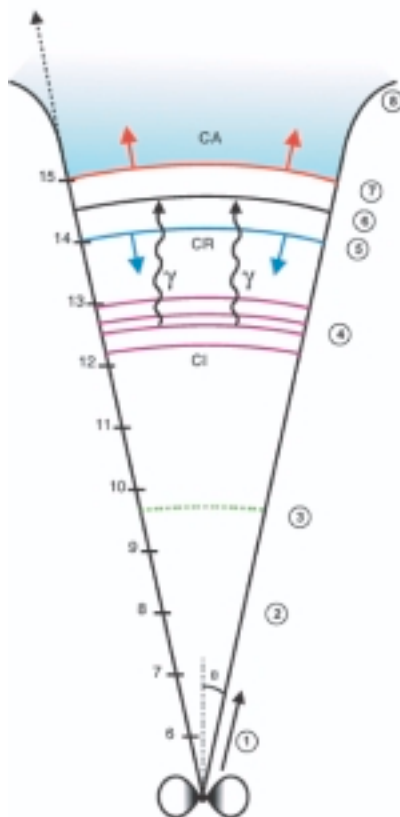
La plupart des modèles sont en accord sur cette dernière étape, qui est la mieux comprise, mais ils diffèrent bien davantage sur les deux premières. L'hypothèse actuellement la plus discutée pour expliquer l'émission gamma invoque des ondes de choc produites à l'intérieur même de l'écoulement relativiste mais d'autres propositions considèrent plutôt qu'elle provient de l'interaction de l'éjecta avec l'enveloppe

d'une supernova ayant explosé peu avant le sursaut. C'est le modèle standard, dit des « chocs internes », qui sera présenté ici (pour un exposé des autres possibilités voir la rubrique « **Pour en savoir plus** »). Enfin, la physique du moteur central est un problème très complexe de relativité générale. Un certain nombre de propositions ont été faites pour expliquer la formation d'un vent relativiste mais aucune n'a jusqu'ici donné lieu à des développements suffisamment détaillés.

Le scénario standard est présenté de manière synthétique à l'aide d'une figure unique dans l'encadré 1, et ses trois étapes sont commentées ci-dessous.

Encadré 1

SCHÉMA GÉNÉRAL DU MODÈLE STANDARD POUR LES SURSAUTS GAMMA



La figure ci-contre illustre le modèle standard des sursauts gamma où une source centrale, probablement un trou noir entouré d'un disque d'accrétion épais, produit un écoulement relativiste confiné dans un cône de demi-ouverture θ .

Sur le côté gauche du cône, la distance (en mètres) à l'objet central est indiquée sur une échelle logarithmique ; les chiffres sur le côté droit correspondent à des phases clés de l'évolution du sursaut :

- (1) accélération de l'écoulement
- (2) la vitesse limite est atteinte ; le facteur de Lorentz moyen dépasse la centaine et l'évolution se poursuit par une phase d'expansion libre
- (3) l'écoulement devient transparent
- (4) zone des chocs internes (CI) et production de l'émission gamma ; l'énergie dissipée dans les collisions de couches de vitesse différente est rayonnée par processus synchrotron
- (5)(6)(7) interaction entre l'écoulement relativiste et l'environnement : (5) est l'onde de choc « retour » (CR) traversant l'écoulement issu de l'objet central ; (6) est la surface de discontinuité séparant l'écoulement du milieu extérieur ; (7) est l'onde de choc « avant » (CA) balayant le milieu extérieur et responsable de la production de la rémanence
- (8) le freinage de l'écoulement par le milieu extérieur diminue son facteur de Lorentz. Au moment où $1/\Gamma$ devient plus grand que θ , une cassure se produit dans la courbe de lumière de la rémanence. La focalisation relativiste limite en effet l'émission du rayonnement à un cône d'ouverture $1/\Gamma$.

La production du vent relativiste

Le « moteur central » du sursaut, constitué d'un trou noir entouré d'un disque épais, doit être capable d'injecter une énergie considérable dans un écoulement collimaté atteignant des vitesses très relativistes. Cette énergie peut provenir de l'accrétion de la matière du disque par le trou noir ou de la rotation du trou noir lui-même en cas de couplage de celui-ci avec la magnétosphère du disque.

Même si l'énergie nécessaire pour expliquer les sursauts est considérable, il semble qu'elle puisse être produite par un tel objet. La plus grande difficulté consiste à injecter cette énergie dans l'écoulement, sans entraîner en même temps une trop grande quantité de matière issue de l'environnement. C'est à cette condition seulement qu'un facteur de Lorentz final dépassant la centaine pourra être atteint. Ce problème, dit de la « pollution baryonique » est redoutable et n'a pas encore trouvé de solution pleinement satisfaisante.

L'émission gamma

Malgré cette difficulté, les modèles d'émission pour les sursauts partent néanmoins du principe qu'un vent relativiste est produit par la source. L'énergie libérée injectée dans le vent s'y trouve donc stockée sous forme cinétique. Elle va ensuite être restituée (avec une plus ou moins grande efficacité) sous forme de rayonnement par dissipation dans des ondes de choc se produisant à l'intérieur même du vent ou dans sa collision avec le milieu environnant. Dans le modèle standard, les chocs internes sont à l'origine de l'émission gamma du sursaut, alors que l'interaction avec le milieu extérieur explique les contreparties à plus basse énergie (les « rémanences »). Les chocs internes ne sont possibles que si la distribution des vitesses (donc du facteur de Lorentz Γ) dans le vent n'est pas uniforme. Il s'agit

là d'une hypothèse vraisemblable car la quantité de matière injectée au cours du temps dans l'écoulement, qui fixe la valeur de $\Gamma(t)$, est particulièrement sensible à la valeur des paramètres physiques du disque, qui peuvent varier sur de très courtes échelles de temps. Les couches de vitesse élevée rattrapent alors celles de vitesse plus faible, ce qui conduit à une série de chocs qui se poursuivent jusqu'à ce que le vent se soit ordonné avec Γ croissant de l'arrière vers l'avant.

Dans la plupart des modèles, l'énergie dissipée est rayonnée par effet synchrotron des électrons accélérés derrière l'onde de choc. Des sursauts synthétiques peuvent alors être construits en suivant l'évolution d'un système constitué d'un grand nombre de couches et en additionnant les contributions de toutes les collisions élémentaires (encadré 2). Les propriétés temporelles et spectrales de ces sursauts synthétiques (forme des pulses élémentaires, relation durée-durée, etc.) sont en accord raisonnable avec les observations. Il est bien sûr difficile de dire si les problèmes qui demeurent pourront être corrigés par des ajustements du modèle ou devront au contraire conduire à sa remise en cause.

Le choc externe et l'origine des contreparties à basse énergie

L'évolution dynamique du vent ne se termine pas avec la séquence des chocs internes. Le gaz éjecté va en effet interagir avec son environnement qui va le freiner progressivement (le facteur de Lorentz décroissant en $t^{-3/8}$ si la densité du milieu extérieur est uniforme). Ce processus est bien connu dans le cadre de l'étude des restes de supernovae. Une onde de choc « avant » se propage dans le milieu interstellaire alors qu'un choc « en retour » balaye le gaz éjecté. Dans le cas des sursauts gamma, le scénario est identique mais l'onde de choc et la matière se déplacent initialement à vitesse relativiste.

Derrière l'onde de choc apparaissent un champ magnétique et une population d'électrons accélérés susceptibles de produire un rayonnement synchrotron. Moyennant quelques hypothèses simples, l'intensité du champ et le facteur de Lorentz caractéristique Γ_e des électrons sont proportionnels au facteur de Lorentz de l'onde de choc, de sorte que l'énergie typique du rayonnement observé $E_{\text{syn}} \propto \Gamma B \Gamma_e^2 \propto \Gamma^4 \propto t^{-3/2}$ diminue avec le temps conformément aux observations (l'énergie caractéristique du rayonnement synchrotron est proportionnelle à $B \Gamma_e^2$ dans le repère propre du vent mais est observée multipliée par le facteur de Lorentz Γ). Dans les premières minutes, le maximum d'émission de la rémanence se situe dans le domaine X puis se déplace vers le visible en quelques heures pour atteindre le domaine radio au bout de quelques semaines. La théorie prédit aussi que le flux décroît en loi de puissance, à nouveau en accord avec les observations.

PERSPECTIVES

La période actuelle correspond à un âge d'or de l'étude des sursauts où l'afflux de données d'observation a fait faire d'importants progrès à la compréhension de ces objets extraordinaires. De nombreux mystères demeurent cependant. Ainsi, nous manquons encore de certitudes sur la nature des sources à l'origine des sursauts. Peut-être sera-t-il nécessaire d'avoir recours à plusieurs populations pour rendre compte séparément des sursauts longs et des sursauts courts. L'émission optique contemporaine du sursaut et l'origine des photons au-delà du GeV restent mal comprises. La production du vent relativiste apparaît comme un problème théorique très difficile.

C'est pour répondre à certaines de ces interrogations que les astrophysiciens ont conçu une nouvelle génération d'instruments. Parmi ceux-ci, certains sont déjà opérationnels, comme les missions spatiales

LES CHOCS INTERNES

Le modèle des chocs internes peut être illustré de manière très simple en considérant deux couches éjectées par le moteur central du sursaut. La première couche caractérisée par le facteur de Lorentz Γ_1 est éjectée à $t = 0$ et la seconde (de facteur de Lorentz $\Gamma_2 > \Gamma_1$) la suit après un temps Δt . Les deux facteurs de Lorentz étant très supérieurs à l'unité, la vitesse des deux couches est donnée par

$\beta_i = v_i/c \simeq \left(1 - \frac{1}{2\Gamma_i^2}\right)$ avec $i = 1, 2$. La seconde couche, plus rapide, rattrape la première au rayon de choc

$$R_{\text{choc}} = \frac{\beta_1\beta_2}{\beta_2 - \beta_1} c\Delta t \simeq \frac{c\Delta t}{\beta_2 - \beta_1} \simeq 2c\Delta t \frac{\Gamma_1^2\Gamma_2^2}{\Gamma_2^2 - \Gamma_1^2}$$

Avec par exemple $\Delta t = 1$ s, $\Gamma_1 = 100$ et $\Gamma_2 = 300$ la collision se produit en $R_{\text{choc}} \simeq 6 \cdot 10^9$ km (soit la distance soleil-Pluton) à grande distance de l'objet central dont le rayon ne dépasse pas la centaine de kilomètres. Une transformation de Lorentz permet de calculer la vitesse d'impact de la couche 2 vue de la couche 1

$$v_{12} = c \frac{\Gamma_2^2 - \Gamma_1^2}{\Gamma_1^2 + \Gamma_2^2}$$

soit $v_{12} = 0.8c$ pour l'exemple proposé. On suppose que les deux couches fusionnent à la suite de la collision. Si leurs masses m sont identiques, le facteur de Lorentz de la couche résultante vaut $\Gamma_r = \sqrt{\Gamma_1\Gamma_2}$ et l'énergie dissipée dans la fusion

$$E_{\text{diss}} = mc^2 \left(\Gamma_1 + \Gamma_2 - 2\sqrt{\Gamma_1\Gamma_2}\right)$$

est rayonnée par émission synchrotron des électrons accélérés dans le choc. En réalité, l'évolution du vent produit par le moteur central doit bien sûr être étudiée à l'aide de codes hydrodynamiques relativistes. Ceux-ci confirment cependant que l'approche simplifiée où le vent est simulé par non plus deux, mais un grand nombre de couches qui n'interagissent que par collisions directes fournit une assez bonne description de l'évolution dynamique.

Les contributions de ces collisions élémentaires s'additionnent pour former le profil global du sursaut. Trois exemples de telles simulations sont donnés ci-contre, où un vent de facteur de Lorentz 400 est freiné par 4 ou 10 couches plus lentes de facteur de Lorentz compris entre 100 et 300. L'accord entre les profils synthétisés de cette manière et les profils observés est satisfaisant. Le modèle des chocs internes souffre cependant de deux difficultés :

(1) une faible efficacité du processus de dissipation dans les chocs (quelques pour cents seulement) qui impose de fortes contraintes au moteur central pour expliquer les événements les plus énergétiques ; (2) un désaccord sur la pente α du spectre à basse énergie. Celle-ci est attendue aux alentours de 1.5 ce qui correspond plutôt au maximum de l'intervalle des valeurs observées (voir supra **Propriétés spectrales**).

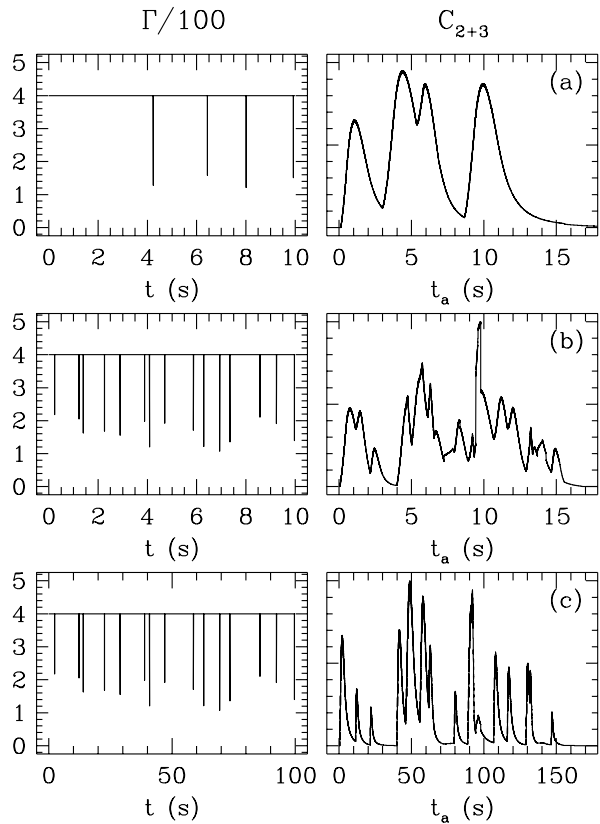


Figure - Exemples de sursauts synthétiques. La partie gauche de la figure présente la distribution du facteur de Lorentz dans le vent relativiste. Celui-ci est produit pendant une durée de 10 ou 100 secondes. Le vent est caractérisé par un facteur de Lorentz d'ensemble égal à 400 mais contient quatre (cas a) ou 15 (cas b et c) couches plus lentes de facteur de Lorentz compris entre 100 et 300 (la distribution du facteur de Lorentz dans les cas b et c est identique, avec simplement une échelle de temps dix fois plus longue en c). Les parties rapides du vent sont freinées par les couches lentes et l'énergie dissipée, rayonnée par effet synchrotron, produit les profils représentés sur le côté droit de la figure. Ces profils sont calculés (pour $z = 0,5$) dans les bandes 2 et 3 de l'expérience BATSE, c'est-à-dire entre 50 et 300 keV (C_{2+3} est le nombre de coups attendus entre 50 et 300 keV en unité arbitraire).

Encadré 3

HETE 2



Figure 1 - Photographie du satellite HETE-2 pendant les essais au sol.

HETE-2 est un petit satellite (120 kg) réalisé sous maîtrise d'œuvre du Massachusetts Institute of Technology (États-Unis) dont l'objectif est de fournir les positions des sursauts gamma le plus rapidement possible après leur détection. Placé sur une orbite équatoriale à 600 km d'altitude le 9 octobre 2000, il emporte un spectromètre gamma (réalisé au CESR à Toulouse) et deux caméras à rayons X (fournies par l'institut RIKEN au Japon et par le MIT). Ces trois instruments surveillent le ciel pour y détecter toute nouvelle source transitoire de rayons X et γ . Lorsqu'une source apparaît, HETE-2 la localise et transmet ses coordonnées vers la terre. Ces informations sont captées par l'une des 14 stations radio réparties le long de l'équateur qui assurent un contact permanent avec le satellite, puis elles transitent par Internet vers les observatoires du monde entier, qui sont ainsi alertés de l'arrivée d'un nouveau sursaut gamma peu après sa détection dans l'espace.

Après deux années et demi de fonctionnement, HETE-2 a fourni les positions de 39 sursauts gamma, dont cinq ont été calculées automatiquement par le satellite et distribuées sur Internet avec un délai compris entre 25 secondes et 9 minutes. Ces localisations ont permis la détection précoce de la rémanence des sursauts, avec à la clef plusieurs résultats nouveaux. GRB 021004 et GRB 021211 ont ainsi montré l'existence d'une période de transition d'une durée de quelques dizaines de minutes entre l'émission classique du sursaut et l'émission rémanente (figure 2).

La localisation rapide de GRB 020813 et GRB 021004 a permis l'obtention de spectres à haute résolution de l'émission rémanente dans les domaines visibles et proche infra-rouge, fournissant un diagnostic précieux sur le gaz environnant la source.

HETE-2 a par ailleurs eu la chance d'observer GRB 030329, l'un des plus proches et des plus brillants sursauts gamma jamais détectés (à une distance de « seulement » deux milliards d'années de lumière de la terre). Après quelques jours, l'émission rémanente de ce sursaut a cessé de décroître et l'on a vu apparaître dans le spectre en énergie de cette émission des raies caractéristiques de la présence d'une supernova. En fournissant la première preuve directe d'un lien entre une explosion de supernova et un sursaut gamma, cette observation représente une étape importante dans notre compréhension de ces événements.

Finalement, HETE-2 a aussi confirmé l'existence de sursauts gamma très « mous », dont l'émission se situe pour l'essentiel en rayons X. L'origine de ces « X-Ray Flashes » et leur relation avec les sursauts font actuellement l'objet de vifs débats.

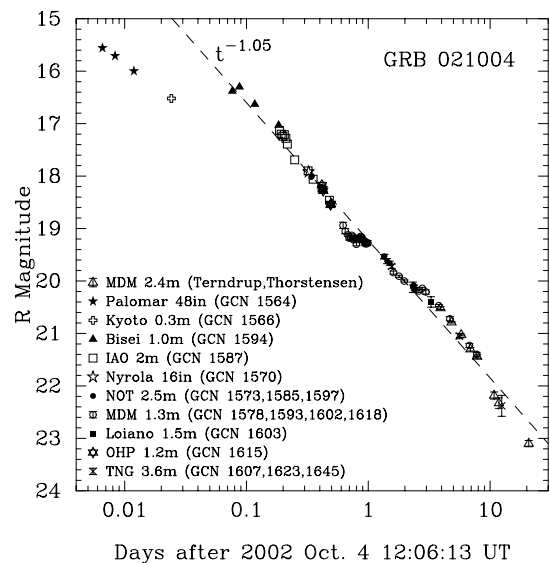


Figure 2 - Évolution de la rémanence de GRB 021004 illustrant la présence d'une émission transitoire durant environ une heure, avant le début de la décroissance en loi de puissance. Cette figure montre cependant que des déviations par rapport à une pure loi de puissance sont observées lorsque la courbe de lumière est échantillonnée avec un pas suffisamment fin.

HETE-2 (encadré 2) et INTEGRAL ou les télescopes automatiques TAROT (encadré 3), ROTSE-2 et SUPER-LOTIS.

D'autres devraient rapidement voir le jour, comme les missions spa-

tiales SWIFT et AGILE, respectivement prévues pour être lancées en 2004 et 2005, ou encore, au sol, les télescopes robotiques ARAGO et REM. La mission SWIFT de la NASA pourrait représenter une étape

décisive dans notre compréhension des sursauts puisque ce satellite mesurera avec précision l'émission visible, X et gamma de plus d'une centaine de sursauts par an (contre dix à 20 par an actuellement).

A plus longue échéance, le satellite GLAST et son compagnon ECLAIRS (s'il est accepté) fourniront une couverture spectrale inégale de l'émission des sursauts, depuis le rayonnement visible jusqu'aux photons gamma très énergétiques.

Ce panorama ne doit pas faire oublier la fantastique panoplie des instruments classiques qui ont largement contribué à l'étude des sursauts gamma. Seuls les grands télescopes au sol permettent actuellement la

mesure du décalage vers le rouge cosmologique des sursauts, et donc la détermination de leur distance et de l'énergie qu'ils libèrent. Le télescope spatial Hubble constitue un outil de choix pour l'étude des galaxies hôtes des sursauts. Les deux grands observatoires spatiaux de rayons X, XMM-Newton et Chandra, ont quant à eux permis l'étude des conditions physiques au voisinage immédiat des sources, y révélant la présence d'éléments produits lors des explosions de supernovae.

Cette abondance de données d'observations couvrant presque tout le spectre électromagnétique, allié au développement de modèles théoriques de plus en plus détaillés et sophistiqués, devrait bientôt permettre de mieux comprendre et d'exploiter toute la richesse physique et astrophysique des sursauts gamma. Mais, comme l'histoire passée des sursauts nous l'a appris, gageons qu'il faut s'attendre encore à quelques surprises...

Encadré 4

TAROT

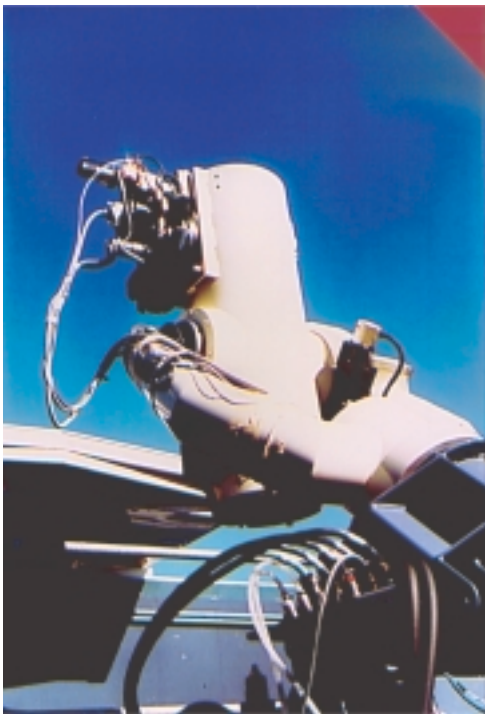


Figure - Tarot.

TAROT est un télescope automatique de 25 cm de diamètre qui est installé sur le plateau du Calern au-dessus de Grasse et dont la maîtrise d'œuvre est assurée par le CESR. La caméra CCD dont il est équipé lui permet de détecter des astres de magnitude 17 en seulement 10 secondes de temps de pose. Son champ de vue de 2° est largement suffisant pour contenir les objets découverts par HETE-2, malgré leur position approximative. Lorsqu'un sursaut détecté par HETE-2 est dans la zone du ciel accessible à TAROT, celui-ci se tourne vers la région concernée en moins de 2 secondes et commence à prendre des images du ciel. TAROT n'est pas unique puisque deux télescopes similaires sont installés aux États-Unis (ROTSE-2 et SUPER-LOTIS). Ce lien automatisé entre instruments spatiaux et au sol est une première. Il a été mis en place par les astronomes pour fournir une couverture précoce de l'émission du sursaut dans un grand domaine de longueur d'onde. Si l'émission visible d'un sursaut est détectée, TAROT en calcule la position avec une précision de 1" d'arc, bien supérieure à celle de HETE-2. Des télescopes plus puissants peuvent alors être pointés en direction de la source, afin d'établir le spectre de l'émission retardée (et donc de déterminer la distance si des raies sont observées) tant que celle-ci est encore assez brillante, c'est-à-dire typiquement dans les premiers jours suivant le sursaut.

POUR EN SAVOIR PLUS

Pour un exposé du modèle standard des sursauts gamma, on pourra consulter la revue écrite par Piran (T.), « Gamma-ray-bursts and the fireball model », **Physics Reports**, 314, 575, 1999. Dans le modèle des « boulets de canon » développé par Arnon Dar et Alvaro De Rujula, la source centrale émet des globules de matière à vitesse très relativiste

qui produisent le sursaut en étant freinés par la matière environnante (reste d'un vent stellaire ou ejecta d'une supernova). Il est exposé par exemple dans Dado (S.), Dar (A.), De Rujula (A.), « The Supernova associated with GRB 030329 », **Astrophys. J.** 594, 2003, L89-L92.

Le modèle proposé par Remo Ruffini et ses collaborateurs considère en particulier la source

d'énergie centrale pour laquelle la présence d'un trou noir chargé est invoquée. Le modèle est présenté dans Ruffini (R.) *et al.*, « Les trous noirs, source d'énergie », *La Recherche*, 353, mai 2002. Dans ce même numéro, on pourra trouver un historique de l'étude des sursauts et une revue des résultats obtenus par le satellite Beppo-SAX.

Article proposé par :
Jean-Luc Atteia, tél. : 05 61 33 28 84, jean-luc.atteia@ast.obs-mip.fr
Robert Mochkovitch, tél. : 01 44 32 81 87, mochko@iap.fr